

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Tomáš Mazálek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**MOTOKOLO SE SPALOVACÍM MOTOREM A
ELEKTRICKÝM PŘENOSEM VÝKONU**

BYCICLE WITH COMBUSTION ENGINE AND ELECTRICAL TRANSFER OF POWER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Mazálek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Tomáš Mazálek

ID: 146058

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Motokolo se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Osadte a oživte veškeré desky plošných spojů navržené v semestrálním projektu.
2. Nahraďte stávající dysfunkční řídicí obvody nově realizovanými obvody a uveďte do chodu řízení měniče i serva plynové klapky.
3. Oživte celé zařízení a doladte potřebné obvody (úrovně ochran, regulátory).
4. Provedte sérii elektrických ověřovacích měření.
5. Zkušebními jízdami prověřte chování stroje a zdokumentujte jeho jízdní vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] P. Vorel, P. Procházka: Řídicí členy v elektrických pohonech (skriptum VUT Brno)

[2] M. Patočka: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je návrh řídicího algoritmu, potřebných řídicích a silových obvodů a návrh desek plošných spojů pro již rozpracovaný koncept jízdního kola se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu. Řídicí algoritmus bylo třeba navrhnout tak, aby co nejúčinněji využíval výkon spalovacího motoru a maximálně snižoval spotřebu paliva a hlučnost zařízení. Všechny obvody byly kompletně realizovány pomocí analogových zapojení, pro které byly navrženy desky plošných spojů v programu Eagle a ty byly následně oživeny a odladěny.

Abstract

The objective of this semester thesis is design of the control algorithm, needed control and power circuits and PCB design for the unfinished bicycle concept with a combustion engine and electric power transmission. The control algorithm had to be designed to make efficient use of the combustion engine performance and to minimize the fuel consumption and noise level of the device. All circuits are fully implemented by analog components for which were designed printed circuit boards using program Eagle and this boards were revived and debugged.

Klíčová slova

Motorové kolo; Elektropohon; Hybridní pohon; Spalovací motor; Synchronní generátor s PM; Usměrnovač; DC/DC měnič

Keywords

Motor bike; Electric motor drive; Hybrid drive; Combustion engine; Synchronous generator with PM; Rectifier; DC/DC converter

Bibliografická citace

MAZÁLEK, T. *Motokolo se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 43 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Jízdní kolo se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

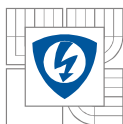
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Pavlu Vorlovi, Ph.D. a Ing. Janu Martišovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

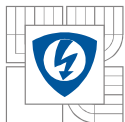
V Brně dne

Podpis autora

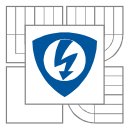


Obsah

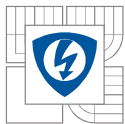
1 ÚVOD	10
2 KONCEPCE POHONU KOLA A ZÁKLADNÍ PARAMETRY	11
2.1 BLOKOVÁ KONCEPCE POHONU	11
2.1.1 ŘÍZENÍ MĚNIČE	11
2.1.2 ŘÍZENÍ OTÁČEK SPALOVACÍHO MOTORU	12
2.2 UŽIVATELSKÉ PARAMETRY	12
2.3 POPIS POUŽITÝCH KOMPONENT	13
2.3.1 SPALOVACÍ MOTOR	13
2.3.2 GENERÁTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY	13
2.3.3 HNACÍ ELEKTROMOTOR	14
2.3.4 JÍZDNÍ KOLO	14
2.3.5 PLYNOVÁ RUKOJEŤ	15
3 MĚNIČ	15
4 NÁVRH ŘÍDÍCÍCH OBVODŮ	17
4.1 OBVODY REALIZUJÍCÍ ŘÍDÍCÍ ALGORITMUS	17
4.1.1 NASTAVOVÁNÍ MAXIMÁLNÍHO MOMENTU POMOCÍ PLYNOVÉ RUKOJETI	17
4.1.2 SNÍMÁNÍ NAPĚTÍ NA DC MOTORU A VYTVOŘENÍ SIGNÁLU ŽÁDANÉHO MOMENTU	17
4.1.3 VYTVOŘENÍ SIGNÁLU ŽÁDANÉHO PROUDU A OTÁČEK SPALOVACÍHO MOTORU	20
4.1.4 ŘÍZENÍ SERVOPOHONU	22
4.1.5 VYTVOŘENÍ PILOVÉHO PRŮBĚHU PRO PULZNĚ ŠÍŘKOVOU MODULACI	25
4.1.6 ZESILOVAČ SIGNÁLU BOČNÍKU	27
4.1.7 NADPROUDOVÁ OCHRANA	28
4.1.8 PŘEPĚŤOVÁ OCHRANA	29
4.1.9 MĚŘENÍ PROUDU MOTOREM	29
4.1.10 NAPÁJECÍ ZDROJ PRO ŘÍDÍCÍ OBVODY, BUDIČE A SVĚTLA	30
4.1.11 ŘÍZENÍ NAPÁJECÍHO ZDROJE	35
4.1.12 ÚPRAVY NA DESCE S VÝKONOVÝM MĚNIČEM	36
5 REALIZACE NAVRŽENÝCH OBVODŮ	40
5.1 DESKA PRO ŘÍZENÍ SERVA OVLÁDAJÍCÍ ŠKRTICÍ KLAPKU	40
5.2 DESKA S POMOCNÝM ZDROJEM	42
5.3 DESKA S ŘÍZENÍM VÝKONOVÝCH TRANZISTORŮ A VYTVOŘENÍM PILY	47
5.4 KOMPLETNÍ MONTÁŽ ELEKTRONIKY	48
6 ZÁVĚR	50
LITERATURA	52
PŘÍLOHA 1: KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY PRO ŘÍZENÍ SERVA A OVLÁDÁNÍ KLAPKY SPALOVACÍHO MOTORU	53
PŘÍLOHA 2: KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY S ŘÍZENÍM VÝKONOVÝCH TRANZISTORŮ A VYTVOŘENÍM PILY	54
PŘÍLOHA 3: KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY S POMOCNÝM ZDROJEM	55



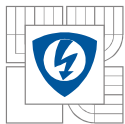
PŘÍLOHA 4: 1. ČÁST SCHÉMATU ZAPOJENÍ DESKY SE SILOVÝMI OBVODY MĚNIČE PŘED ÚPRAVAMI.....	56
PŘÍLOHA 5: 2. ČÁST SCHÉMATU ZAPOJENÍ DESKY SE SILOVÝMI OBVODY MĚNIČE PŘED ÚPRAVAMI.....	57
PŘÍLOHA 6: KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY SILOVÝMI OBVODY MĚNIČE PO ÚPRAVÁCH.....	58

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obrázek 1. - Blokové schéma řídicího algoritmu.....</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2. - Omezovací charakteristika maximálního momentu a závislost výkonu a příkonu na napětí DC motoru [4].....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 3. - Městské jízdní kolo Amsterdam Original 3i</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4. - Zapojení měniče.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 5. - Vlevo funkce snižujícího měniče, vpravo funkce zvyšujícího měniče</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 6. - Schéma pro snímání napětí na DC motoru a vytvoření žádaného momentu</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 7. - Závislost napětí v bodě A na napětí DC motoru.....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 8. - Pilovitý průběh PILA 1</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 9. - Závislost střídý v bodě B na napětí DC motoru</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 10. - Závislost napětí v bodě C (žádaného momentu) na napětí DC motoru.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 11. - Vytvoření signálu žádaného proudu a otáček spalovacího motoru.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 12. - Obdélníkové pulzy v bodě D</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 13. - Závislost střídý v bodě D na žádaném momentu</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 14. - Závislost otáček spalovacího motoru na požadovaném výkonu</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 15. - Schéma řízení servopohonu.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 16. - Nabíjení a vybíjení kondenzátoru Cx a potřebné pulzy pro ovládání servopohonu.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 17. - Vytvořené pilovité průběhy PILA 1 a PILA 2.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 18. - Schéma pro tvorbu pilovitého signálu.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 19. - Zesilovač signálu bočníku</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 20. - Zapojení nadproudové ochrany</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 21. - Zapojení přepětové ochrany.....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 22. - Zapojení blokujícího měniče s transformátorem.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 23. - Magnetizace a demagnetizace transformátoru blokujícího měniče</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 24. - Proud primární cívkou transformátoru</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 25. - Proud sekundární cívkou transformátoru</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 26. - Schéma zapojení spínání tranzistoru.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 27. - Odstraněný obvod (platí pro body 1 až 5).....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 28. - Odstraněné čidlo LEM (bod 6).....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 29. - Odstraněné snižovače s MC33063(bod 9).....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 30. - Upravená deska s měničem - vrchní pohled.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 31. - Upravená deska s měničem - spodní pohled</i>	<i>39</i>

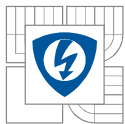


<i>Obrázek 32. - Layout DPS pro ovládání serva a vytvoření Mž, Iž a Pž.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 33. – Osazovací plán DPS pro ovládání serva a vytvoření Mž, Iž a Pž</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 34. - Layout DPS pomocného zdroje</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 35. - Osazovací plán DPS pomocného zdroje.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 36. - Průběh napětí na gate spínacího tranzistoru bez žárovky.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 37. - Průběh napětí na gate spínacího tranzistoru s připojenou žárovkou.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 38. - Průběh na drainu spínacího tranzistoru bez žárovky.....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 39. - Průběh na drainu spínacího tranzistoru s připojenou žárovkou.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 40. - Osazená DPS pomocného zdroje namontovaná v plastové krabici</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 41. - s řízením výkonových tranzistorů a vytvořením pily.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 42. - Osazovací plán s řízením výkonových tranzistorů a vytvořením pily.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 43. - Průběh napětí u_x na tranzistorech T3 a T4</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 44. - Průběh napětí u_y na tranzistorech T7 a T8.....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 45. - Průběh nabíjení a vybíjení kondenzátoru C_x</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 46. - Blokové schéma propojení všech desek.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 47. - Fotografie kompletně osazené krabice s řídicí i výkonovou elektronikou</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 48. - Elektronika namontovaná v kole při oživování</i>	<i>50</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1. - Uživatelské parametry</i>	<i>12</i>
<i>Tabulka 2. - Katalogové hodnoty spalovacího motoru [5]</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 3. - Katalogové hodnoty generátoru [6]</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 4. - Štítkové hodnoty hnacího elektromotoru</i>	<i>14</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B [T] magnetická indukce

C [F] kapacita

f [Hz] frekvence i

[A] elektrický proud

L [H] indukčnost

M [Nm] moment

N [-] počet závitů

P [W] elektrický výkon

S_{Fe} [m²] průřez jádra

s [-] střída

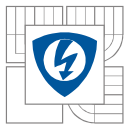
t [s] čas

T [s] perioda

u [V] elektrické napětí

v [m·s⁻¹] rychlost

η [%] účinnost



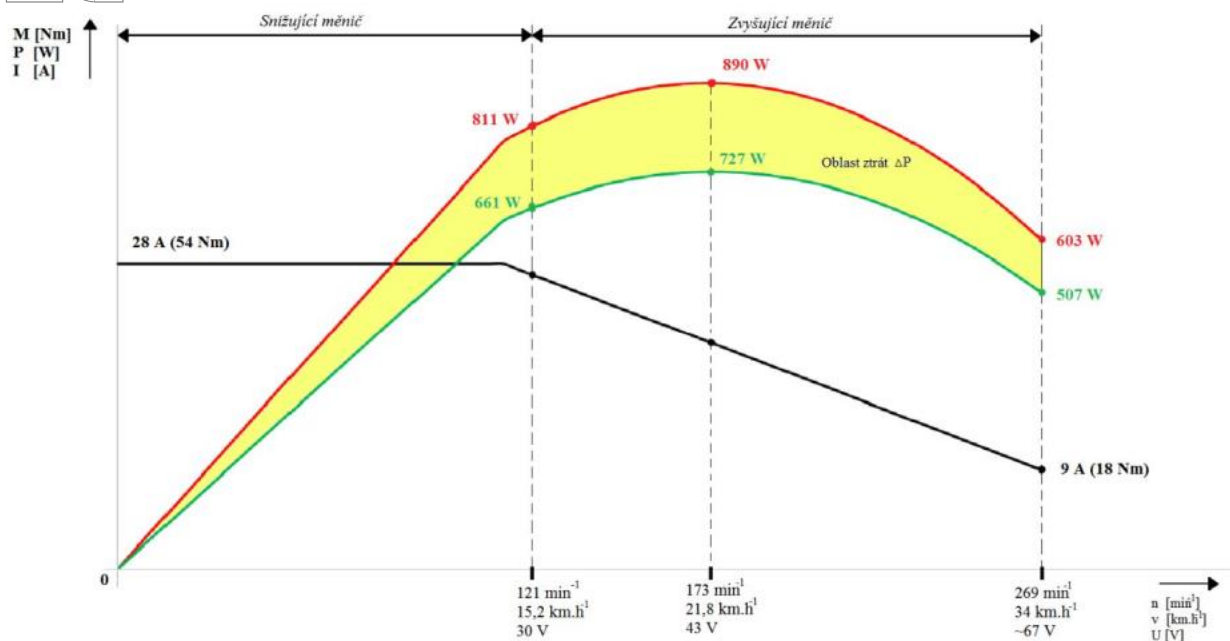
1 ÚVOD

Elektrokola jsou ve velkém prodávána zejména v Holandsku a Číně jako velmi levný a spolehlivý dopravní prostředek zejména do měst, kde se u hromadné dopravy či automobilu často lidé potýkají hlavně s časovými komplikacemi. V elektrokolech naleznou zalíbení také ti, kteří nejsou příznivci sportu nebo také bohužel ti, kterým šlapání není ze zdravotních důvodů umožněno. Oproti motocyklům mají také výhodu po ekologické stránce, kdy u nich stačí dobít baterii a nevypouští tak do ovzduší látky škodící životnímu prostředí. Elektrický pohon je také velmi tichý a pohodlný.

Kola napájená z baterie však mají tu nevýhodu, že nemají velký dojezd. Akumulátory jsou navíc drahé a to tím více, čím větší mají kapacitu. Z toho důvodu tedy máme možnost využít hybridního pohonu, kdy pomocí spalovacího motoru a generátoru vyrábíme elektrickou energii a tou pak poháníme hnací elektrický motor. Místo mechanické převodovky jsme schopni moment a otáčky regulovat měničem, který je ovládán plynovou rukojetí. Tento princip je běžně využíván v některých lokomotivách.

Pokud však chceme maximálně využít účinnosti spalovacího motoru, musíme navrhnout řídicí algoritmus tak, abychom mu byli schopni nastavit otáčky přímo odpovídající požadovanému výkonu dodávanému do hnacího DC motoru. Spalovací motor tak vždy poběží v optimálním režimu a sníží se tím jeho spotřeba.

Ve zpětnovazební smyčce je měřeno napětí na DC motoru a dále zpracováváno v omezovací charakteristice (obr. 2) tak, že omezí moment v závislosti na napětí motoru, aby se motor proudově ani napěťově nepřetěžoval.



Obrázek 2. - Omezovací charakteristika maximálního momentu a závislost výkonu a příkonu na napětí DC motoru [4]

Takto omezený moment je regulován pomocí plynové rukojeti a výstupem je již výsledný signál pro žádaný moment. Ten se dále násobí s napětím (otáčkami) DC motoru a po úpravě přes převodní charakteristiku již získáváme žádané otáčky spalovacího motoru v závislosti na požadovaném výkonu.

Dle žádaného momentu také řídíme měnič a to přes Omezovač při vzrůstu žádaného momentu. Ten je tu z toho důvodu, aby při požadavku na rychlé zvýšení momentu nedošlo k zadušení spalovacího motoru. Ten je totiž ovládán mechanicky pomocí servopohonu a mechanické děje jsou obecně mnohonásobně pomalejší než děje elektrické.

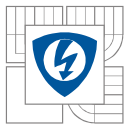
2.1.2 Řízení otáček spalovacího motoru

Otáčky spalovacího motoru musí být ovládány v závislosti na odchylce požadovaných otáček od jeho skutečných otáček. K tomu nám slouží PI regulátor, který řídí tvorbu obdélníkových pulzů vhodné šířky pro ovládání servopohonu a řídí tak polohu škrticí klapky spalovacího motoru. Ten se spolu s generátorem roztočí na požadované otáčky a přes usměrňovač je tedy napájen meziobvod měniče.

2.2 Uživatelské parametry

Tabulka 1. - Uživatelské parametry

Výkon (elektromotoru)	727 W
Váha	29 kg
Rychlost	34 km/h
Spotřeba	340 g/kW.h



2.3 Popis použitých komponent

Pro tento projekt bylo vybráno klasické městské jízdní kolo Amsterdam Original 3i. Spalovací motor s generátorem jsou umístěny uprostřed rámu kola, takže nenarušují stabilitu při jízdě a výfukové plyny nejsou hnány na řidiče. Palivová nádrž o objemu 1l je umístěna u osy zadního kola. Nad generátorem je upevněna plastová krabice pro umístění měniče s veškerou řídicí elektronikou. Hnací elektrický motor je vpleten do náboje předního kola, což šetří místo a nekáží vyvážení a stabilitu kola při jízdě.

V následujících kapitolách budou popsány parametry jednotlivých komponentů.

2.3.1 Spalovací motor

Jako zdroj energie byl vybrán čtyřtákní spalovací benzínový motor Subaru Robin EH035. Přehled katalogových hodnot je uveden v tabulce 2.

Tabulka 2. - Katalogové hodnoty spalovacího motoru [5]

Objem válce	[cm ³]	33,5
Maximální výkon	[kW]	1,18 (1,60 HP) / 7000 min ⁻¹
Maximální moment	[N.m]	1,76
Chlazení	[-]	vzduch
Typ oleje	[-]	Automobilový SAE 20 nebo 30, třídy SF nebo vyšší
Množství oleje	[l]	0,1
Měrná spotřeba paliva	[g.kW ⁻¹ .h ⁻¹]	340
Váha	[kg]	3,5

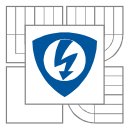
Maximální výkon 1,18 kW je pro naši aplikaci dostačující, protože pro výpočet byla použita maximální hodnota výkonu 1000 W.

2.3.2 Generátor s permanentními magnety

Pro tento projekt je využíván synchronní generátor s permanentními magnety typu AXI 5345/18 Gold Line od firmy Model Motors. Jedná se o třífázový motor (v naší aplikaci tedy generátor), který bývá využíván hlavně modeláři pro pohon letadlových modelů.

Tabulka 3. - Katalogové hodnoty generátoru [6]

Konstanta generátoru	K_v [min ⁻¹ /V]	171
Maximální účinnost	η_{\max} [%]	94
Proud při maximální účinnosti	I_n [A]	25 – 63
Maximální zatížitelnost	I_{\max} [A]	75 A (po dobu 30 s)
Vnitřní odpor	R_i [mΩ]	42



Počet pólů	[-]	14
Váha	m [kg]	0,995

Pro výpočet obvodů bylo uvažováno maximální usměrněné a vyhlazené napětí meziobvodu 58 V. Tato hodnota byla vypočítána následovně (uvažovány max. otáčky spalovacího motoru 7000 ot./min):

$$U_1 = \frac{n_{sp}}{K_v} = \sqrt{2} * \frac{7000}{171} = 57,9 \text{ V} \quad (1)$$

A výpočet minimální hodnoty napětí meziobvodu (pro otáčky volnoběhu 1600ot./min):

$$U_1 = \frac{n_{sp}}{K_v} = \sqrt{2} * \frac{1600}{171} = 13,2 \text{ V} \quad (2)$$

2.3.3 Hnací elektromotor

Byl použit stejnosměrný motor s permanentními magnety od firmy Heinzmann se štítkovými hodnotami:

Tabulka 4. - Štítkové hodnoty hnacího elektromotoru

Jmenovitý moment	24,6 Nm
Jmenovitý proud	13 A
Jmenovité napětí	24 V
Jmenovitý výkon	250 W
Jmenovité otáčky	97 ot./min
Účinnost při jmenovitém výkonu	78,9 %
Maximální moment	54 Nm
Maximální proud	28 A

Napětí na motoru se pohybuje v rozmezí od 0 do 65 V, takže je motor poněkud napětově přetěžován. Z toho důvodu budou více namáhány uhlíky na komutátoru a bude třeba je časem vyměnit za tvrdší.

2.3.4 Jízdní kolo

Pro realizaci práce bylo vybráno kolo Amsterdam Original 3i s hmotností 22 kg.



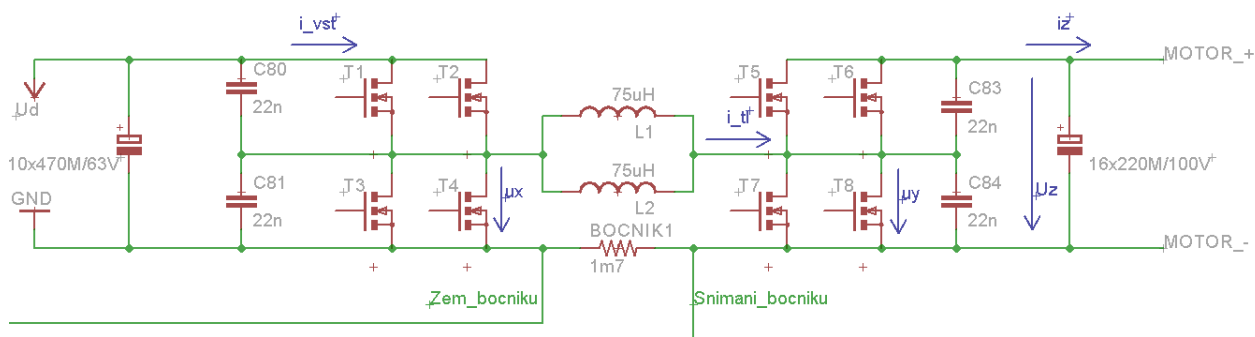
Obrázek 3. - Městské jízdní kolo Amsterdam Original 3i

2.3.5 Plynová rukojeť

Pro zadávání požadovaného momentu, byla nainstalována plynová rukojeť. Ta je napájena napětím +5V a její výstup se pohybuje v rozmezí od 0,8 V do 4,3 V. Součástí rukojeti je i tlačítko pro vypnutí zapalování spalovacího motoru.

3 MĚNIČ

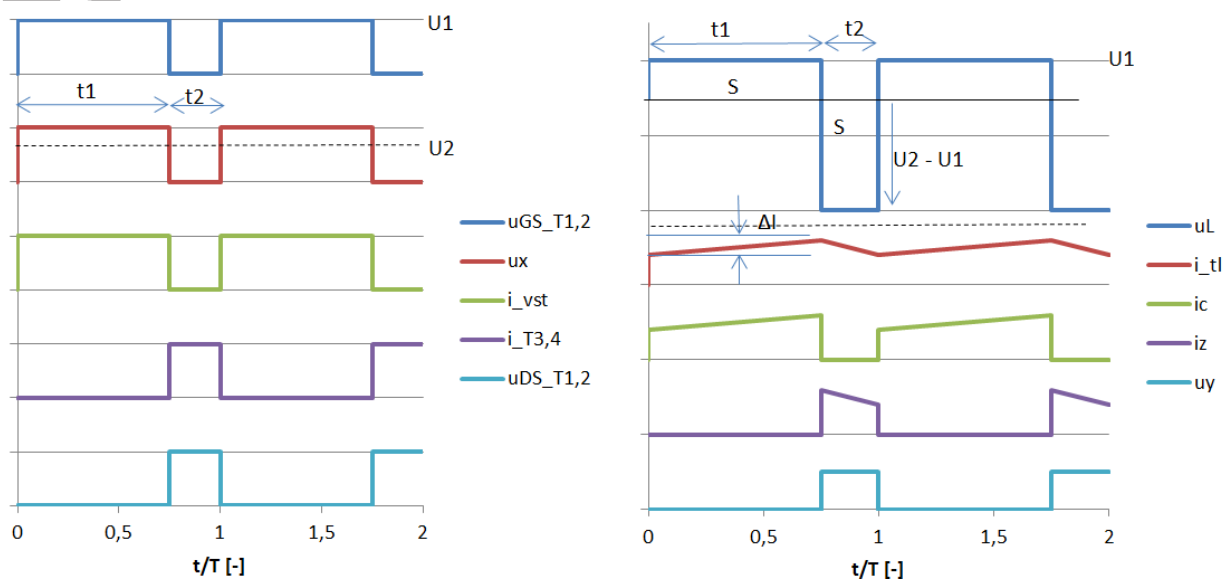
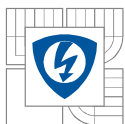
Zapojení měniče je na Obr. 2:



Obrázek 4. - Zapojení měniče

Pro tuto aplikaci byl sestaven měnič, který musí pracovat ve zvyšujícím i snižujícím režimu. Toho je dosaženo tak, že ve snižujícím režimu jsou tranzistory T_7 a T_8 trvale uzavřeny a tranzistory T_5 a T_6 trvale otevřeny. Tranzistory T_1 a T_2 jsou spínány se střídou s a tranzistory T_3 a T_4 se střídou „1-s“. T_3 a T_4 zde nahrazují diody, které slouží k rekuperaci. Tím se dosahuje nižších ztrát měniče. Funkci měniče dále ukazuje obrázek č. 5. Snižující měnič tedy dokáže pracovat až do střidy 1, tj. do chvíle, kdy začne pracovat měnič zvyšující. Závislost výstupního napětí na vstupním lze jednoduše vyjádřit takto [3]:

$$U_x = U_d \cdot s \quad (3)$$



Obrázek 5. - Vlevo funkce snižujícího měniče, vpravo funkce zvyšujícího měniče

Ve zvyšujícím režimu se naopak sepne dvojice T_1 a T_2 a potom T_3 a T_4 jsou uzavřeny. T_5 a T_6 spínají se střídou s a T_7 a T_8 se střídou $1-s$. T_7 a T_8 zde fungují opět místo rekuperačních diod. Protože uvažujeme maximální hodnotu napětí na elektromotoru 65 V, může být maximální střída následovná (při minimálním napětí meziobvodu $U_d = 13$ V) [3]:

$$s_{max} = 1 - \frac{U_y}{U_z} = 1 - \frac{13}{65} = 0,8 \quad (4)$$

A závislost výstupního napětí na vstupním se vypočítá takto[3]:

$$U_z = U_y \frac{1}{1-s} \quad (5)$$

4 NÁVRH ŘÍDÍCÍCH OBVODŮ

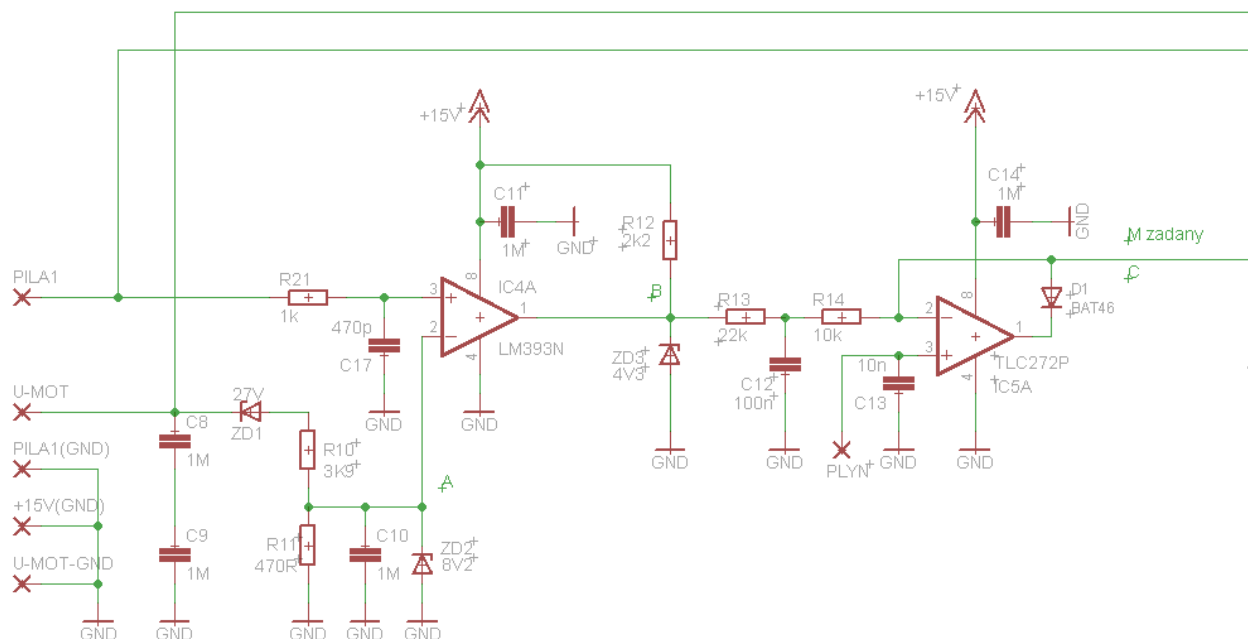
4.1 Obvody realizující řídicí algoritmus

Popis navrženého elektrického obvodu bude vysvětlen tak, aby odkazoval na blokové schéma z předchozí kapitoly.

4.1.1 Nastavování maximálního momentu pomocí plynové rukojeti

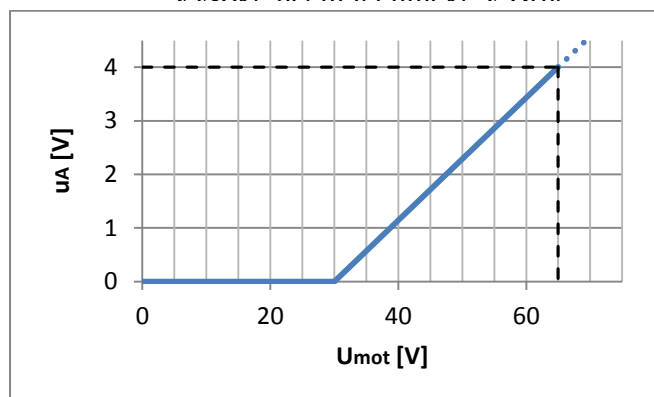
Omezování momentu probíhá dle výše zmíněné omezovací charakteristiky (obr. 2). Omezení probíhá ze dvou důvodů. Jednak potřebujeme měnit zrychlení stroje (omezení charakteristiky zhora) a jednak při vysoké rychlosti musíme chránit elektromotor před vysokými otáčkami a dále nezrychlovat (omezení charakteristiky zprava). Při maximálním vytočení plynové rukojeti je moment omezen na hodnotě 54 Nm (štitková hodnota elektromotoru).

4.1.2 Snímání napětí na DC motoru a vytvoření signálu žádaného momentu



Obrázek 6. - Schéma pro snímání napětí na DC motoru a vytvoření žádaného momentu

Popis tohoto obvodu začíná snímáním napětí na hnacím DC motoru. Přivedené napětí je filtrováno kondenzátory C8 a C9 v sérii. Toto opatření je tu kvůli velkému rušení na kartáčích při běhu motoru. Stabilizované napětí je připojeno na dělič tvořený Zenerovou diodou ZD1 a odpory R10 a R11. Zde je třeba zmínit závislost výstupního napětí z děliče v bodě „A“ na napětí motoru:



Obrázek 7. - Závislost napětí v bodě A na napětí DC motoru

Dioda ZD1 způsobí, že výstupní napětí z děliče bude nulové až do hodnoty $U_{\text{mot}} = 30 \text{ V}$. Od této hodnoty se začíná napětí lineárně zvyšovat, a to v poměru odporů R_{10} a R_{11} až do hodnoty 4 V při max. napětí motoru 65 V. Při plném napětí el. motoru byl uvažován proud děličem 8 mA. Součet odporů při tomto proudu a napětí 35 V se vypočítá ze vztahu:

$$R_{\Sigma} = \frac{U_{\text{mot,max}} - U_{ZD}}{I_{ZD}} = \frac{65 - 30}{8 \text{ mA}} = 4375 \Omega$$

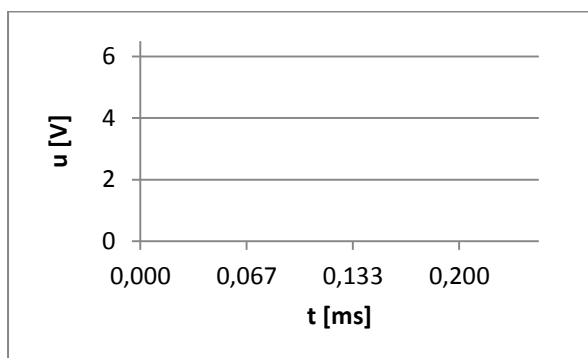
Hodnota odporu R_{11} se vypočte následovně:

$$R_{11} = \frac{u_{A,\text{max}}}{U_{\text{mot,max}} - U_{ZD}} * R_{\Sigma} = \frac{4 \text{ V}}{35 \text{ V}} * 4375 = 500 \Omega \gg \text{zvoleno } 470R$$

A odpor R_{10} :

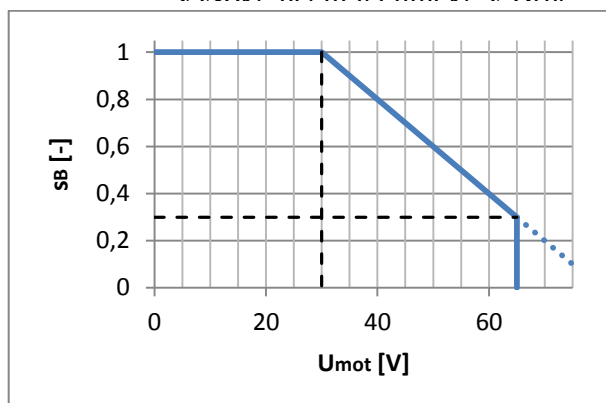
$$R_{10} = R_{\Sigma} - R_{11} = 4375 - 470 = 3905 \Omega \gg \text{zvoleno } 3k9$$

Kondenzátor C10 je pro další vyhlazení a dioda ZD2 slouží jako ochrana proti případným špičkovým napětím.



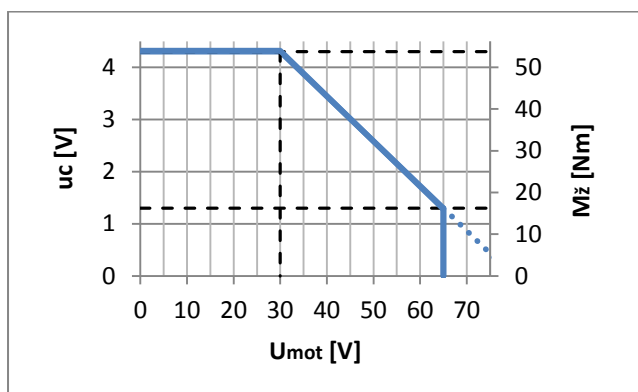
Obrázek 8. - Pilovitý průběh PILA 1

Pilové napětí (PILA 1) je přivedeno na dolní propust tvořenou součástkami R_{21} a C_{17} s časovou konstantou 0,47 μs . Tento člen vyhladí případná rušení pilového napětí. Toto napětí je porovnáváno komparátorem IC4A. Výstupem z komparátoru je PWM modulace napětí u_A , jehož maximální hodnota nepřesáhne hodnotu 4,3 V díky diodě ZD3. Závislost střídavého napětí motoru je na obr. 6:



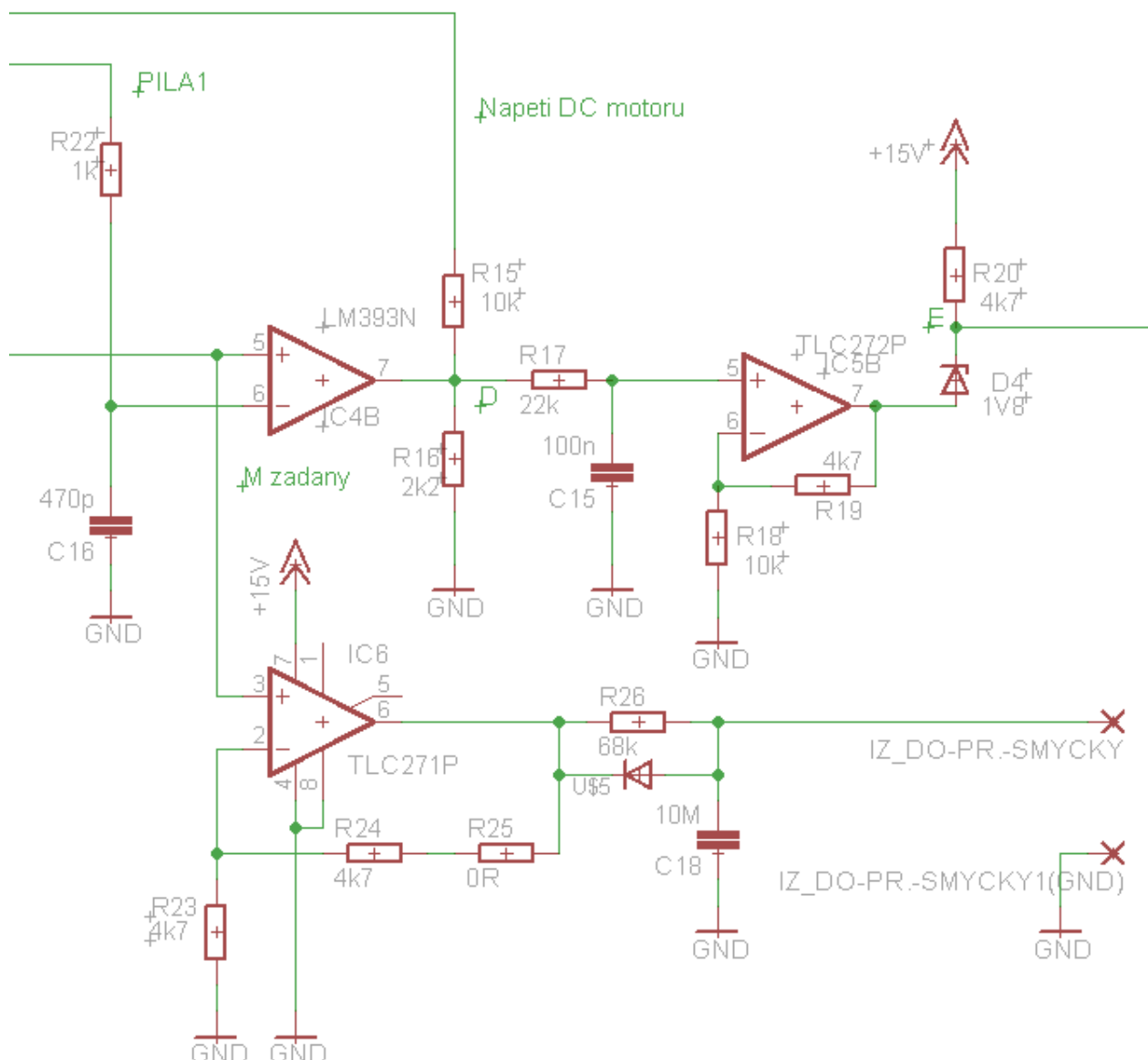
Obrázek 9. - Závislost střídý v bodě B na napětí DC motoru

V této závislosti je vidět regulační struktura již popsaná v kapitole 3.1.1. Tento PWM signál je následně vyhlazen dolní propustí tvořenou součástkami R13 a C12 s časovou konstantou 2,2 ms. Toto napětí je přes odpor R14 přivedeno na invertující vstup omezovače dle plynové rukojeti s označením IC5A. Na neinvertující vstup je přiveden signál z plynové rukojeti o velikosti napětí v rozsahu od 0,8 V do 4,3 V. Omezovač funguje tak, že pokud napětí plynové rukojeti je větší než vyfiltrovaná hodnota PWM signálu, sníží napětí na katodě diody D1 tak, aby tento rozdíl vyrovnal, a tím snižoval výšku PWM signálu. Tento signál nyní můžeme nazvat jako žádaný moment nebo také napětí u_C , což je obraz tohoto momentu. Závislost žádaného momentu neboli napětí u_C na napětí DC motoru je v obr. 8 :



Obrázek 10. - Závislost napětí v bodě C (žádaného momentu) na napětí DC motoru

4.1.3 Vytvoření signálu žádaného proudu a otáček spalovacího motoru



Obrázek 11. - Vytvoření signálu žádaného proudu a otáček spalovacího motoru

Pilový signál je přes dolní propust R22 a C16 s časovou konstantou 0,47μs přiveden na invertující vstup komparátoru IC4B. Ten porovnává žádaný moment a s pilou a výstupem je opět PWM modulace žádaného momentu, jehož výška je následně měněna děličem R15 a R16 v závislosti na napětí DC motoru. Postup návrhu děliče je obdobný jako v předchozí kapitole. Proud děličem při plném napětí 65 V uvažujeme 5 mA.

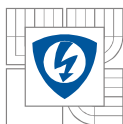
$$R_{\Sigma} = \frac{U_{mot,max}}{I_{Dělič}} = \frac{65}{5 \text{ mA}} = 13 \text{ k}\Omega$$

Hodnota odporu R11 se vypočte následovně:

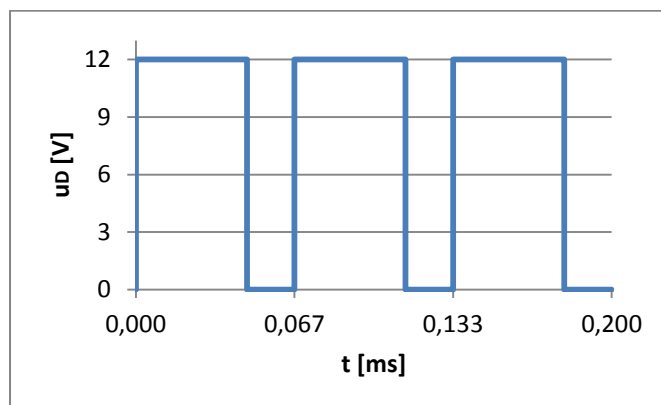
$$R_{16} = \frac{u_{D,max}}{U_{mot,max}} * R_{\Sigma} = \frac{12}{65} * 13000 = 2400 \Omega \gg \text{zvoleno } 2k2$$

A odpor R15:

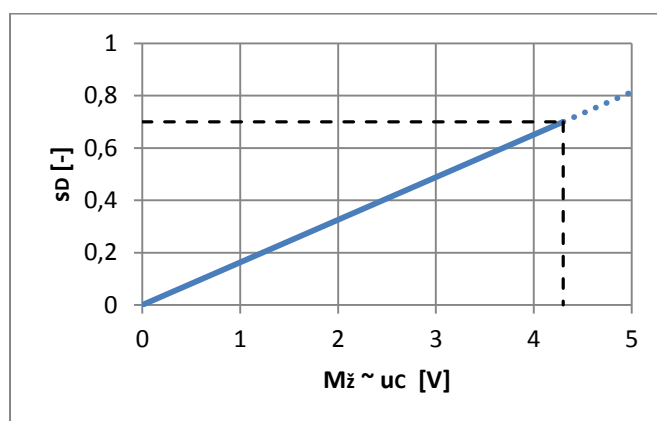
$$R_{15} = R_{\Sigma} - R_{16} = 13000 - 2200 = 10800 \Omega \gg \text{zvoleno } 10k$$



Výstupem je tedy PWM signál, který pomocí střídny v rozmezí 0 až 0,7 nese informaci o žádaném momentu a pomocí výšky pulzů v rozmezí 0 až 12 V nese otáčky motoru (napětí na DC motoru). Příklad tvaru pulzů při max. napětí motoru 65 V a plném žádaném momentu 54 Nm je na obr. 10 a závislost střídny na žádaném momentu je na obr. 11.



Obrázek 12. - Obdélníkové pulzy v bodě D



Obrázek 13. - Závislost střídny v bodě D na žádaném momentu

Po vyhlazení pomocí další dolní propusti R17 a C15 s časovou konstantou 2,2 ms dostáváme signál žádaného výkonu. Pro max. napětí motoru 65 V a max. žádaný moment 54 Nm (proud 28 A) dostáváme žádaný výkon 1820 W. Tato hodnota je pouze teoretická, protože jí nelze dosáhnout, ale signál po vyhlazení by tedy měl tuto hodnotu:

$$u_{D,max} * s_{max} = 12 * 0,7 = 8,4 \text{ V}$$

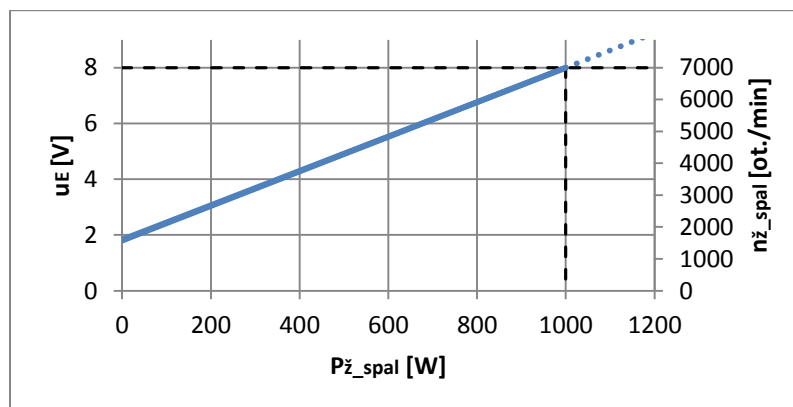
Pro reálnou hodnotu 1000 W zde bude toto napětí:

$$\frac{1000 \text{ W}}{1820 \text{ W}} * 8,4 \text{ V} = 4,6 \text{ V}$$

Protože by však toto napětí při plném žádaném výkonu nestačilo pro řízení na max. otáčky spalovacího motoru, musí být ještě zesíleno neinvertujícím zesilovačem se zesílením daným odpory R18 a R19, které je již dostačující (bude vysvětleno dále):

$$U_{výst} = U_{vst} * \left(1 + \frac{R_{19}}{R_{18}}\right) = 4,6 * \left(1 + \frac{4700}{10000}\right) = 6,8 \text{ V}$$

Pro řízení servopohonu potřebujeme pro max. otáčky spalovacího motoru (7000 ot./min) signál o hodnotě 8 V. Dále pro volnoběh (1600 ot./min) je třeba napětí pouze 1,8 V. Zenerova dioda D4 byla tedy nahrazena svítivou diodou červené barvy v propustném směru, která má prahové napětí právě 1,8 V. Spolu s odporem tedy tvoří dělič, jehož výstupní charakteristika vypadá takto:



Obrázek 14. - Závislost otáček spalovacího motoru na požadovaném výkonu

Výstupní signál tedy udává žádané otáčky spalovacího motoru, který je dále zpracovávám v obvodu pro řízení servopohonu.

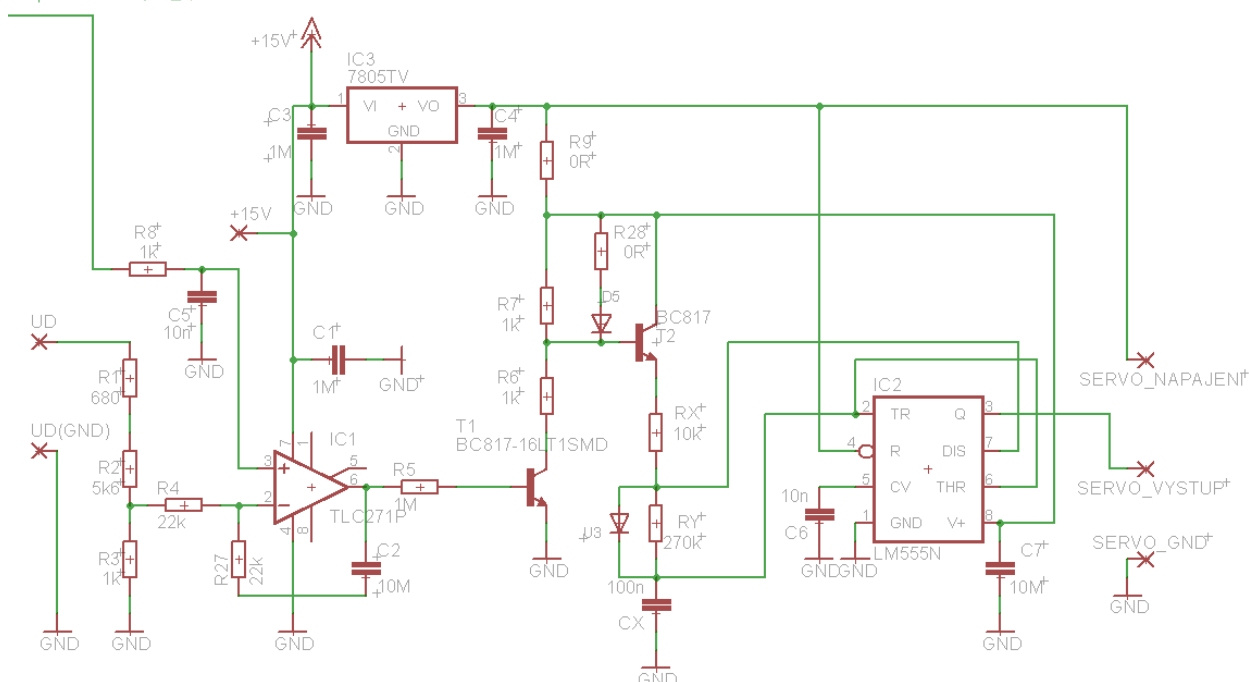
Nakonec je třeba objasnit výstup pro žádaný proud do proudové smyčky měniče. Protože je hodnota žádaného momentu obrazem proudu, je třeba jej pouze zesílit z 4,3 V na potřebnou hodnotu 10 V. Tato hodnota odpovídá momentu 54 Nm a proudu 28 A. Potřebujeme tedy toto zesílení:

$$U_{výst} = U_{vst} * \left(1 + \frac{R_{24} + R_{25}}{R_{23}}\right) = 4,3 * \left(1 + \frac{5600 + 560}{4700}\right) = 9,9 \text{ V}$$

Aby nedošlo k zadušení spalovacího motoru rychlým zatížením generátoru, je před výstup tohoto obvodu ještě umístěn omezovač při vzrůstu žádaného momentu (proudu) tvořený opět dolní propustí s velkou časovou konstantou 0,68 s. Toto zpoždění je dostačující pro náběh spalovacího motoru na maximální otáčky. Aby však obvod dokázal rychle ubrat plyn, je zde paralelně k odporu R26 umístěna dioda D5, která zajistí rychlé vybíjení kondenzátoru C18 v případě, že se žádaný moment sníží.

4.1.4 Řízení servopohonu

Řízení servopohonu má za úkol měnit šířku pulzů, které ovládají natočení páky a tím ovládají škrtecí klapku spalovacího motoru. Schéma zapojení je na obr. 13.



Obrázek 15. - Schéma řízení servopohonu

Na vstup obvodu jsou přivedeny dva signály. Prvním jsou žádané otáčky spalovacího motoru, které jsou filtrovány dolní propustí s časovou konstantou 10 μ s. Tento signál je přiveden na neinvertující vstup PI regulátoru IC1. Druhým vstupem je napětí U_D , což je napětí generátoru usměrněné Graetzovým můstkem, což je obrazem otáček spalovacího motoru v rozmezí od 13,2 V pro otáčky 1600 ot./min až 58 V pro otáčky 7000 ot./min. Postup návrhu děliče je opět stejný jako v předchozích kapitolách, takže není třeba jej již znovu zmiňovat.

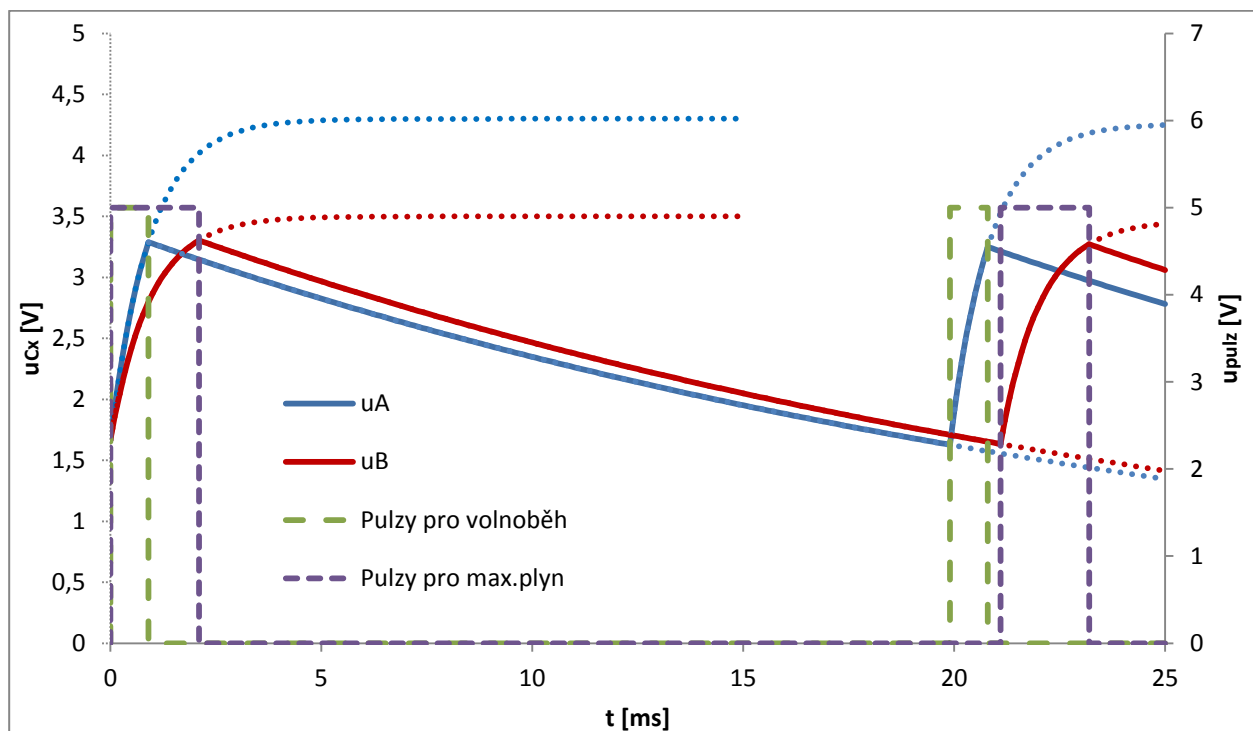
V návrhu bylo původně zamýšleno namísto PI regulátoru zapojení integrátoru, ale při ožiování obvod kmital a bylo třeba přidat P složku a tu nastavit experimentálně.

PI regulátor řídí výstupní napětí tak, aby mezi vstupy udržel virtuální napětí 0 V. Vyrovnává tak odchylku mezi skutečnými a žádanými otáčkami spalovacího motoru. Výstup PI regulátoru je dále připojen na tranzistor T₁. Ten se v případě požadavku na zvýšení otáček otevře, čímž začne odpory R₆ a R₇ protékat proud (nulový odpor R₉ je zde pouze z důvodu konstrukce DPS a nemá vliv na zapojení). Tranzistor T₂ je zapojen jako emitorový sledovač, který má při plném otevření na emitoru o 0,6 V méně než na vstupu. Toto napětí však nemůže být vyšší než prahové napětí diody D₅. Původně byla v sérii s diodou D₅ ještě druhá dioda, ale ta byla odstraněna, při ožiování, protože obvod nebyl schopen servo nastavit na požadovanou hodnotu.

Lineární napěťový stabilizátor 7805 nám snižuje napájecí napětí 15 V na hodnotu 5 V pro napájení obvodu 555.

Integrovaný obvod 555 [4] má široké využití. V našem provedení je zapojen jako astabilní klopný obvod. Vstupy 2 a 6 jsou spojeny a jedná se o řídicí vstupy. Napětí na nich se pohybuje mezi $1/3$ a $2/3$ napájecího napětí U_{cc} . Pokud se tedy napětí na těchto vstupech zvyšuje od $1/3$ do $2/3$ U_{cc} , je na výstupu 3 hodnota U_{cc} . Pokud se pohybuje z $2/3$ na hodnotu $1/3$ U_{cc} , je na výstupu 3 napětí 0 V. Dále je důležitý vstup 7, který je právě v době změny napětí z $2/3$ na $1/3$ U_{cc} připojen na zem.

Délka pulzů se dá řídit rychlostí nabíjení a vybíjení kondenzátoru C_x . Pro názornost je zde uveden graf na obr. 14:



Obrázek 16. - Nabíjení a vybíjení kondenzátoru C_x a potřebné pulzy pro ovládání servopohonu

Délka pulzů (zelený a fialový průběh) je určena velikostí součástek R_x a C_x a v závislosti na otevření tranzistoru T_2 . Je třeba také uvést, že dioda U_3 zde slouží k urychlení nabíjení kondenzátoru C_x . Vybíjení je poté dáno velikostí odporu R_y , který je řádově 10x vyšší hodnoty. V grafu (obr. 14) tedy můžeme vidět dva typy pulzů pro volnoběh a max. plyn a dva různé průběhy nabíjení a vybíjení kondenzátoru C_x . Modrý průběh je ukázka nabíjení C_x na asymptotickou hodnotu U_A . Tato hodnota je určena z rozdílu napájecího napětí a plně otevřeného přechodu C-E tranzistoru T_2 . Výsledná hodnota tedy bude $U_A = 5 - 0,6 - 0,1 = 4,3$ V. Pokud známe rovnice pro nabíjení kondenzátoru, můžeme určit časovou konstantu τ_{nab} (doba zapnutí $t_A = 0,9$ ms a $t_B = 2,1$ ms). Tyto rovnice vypadají takto:

Pro volnoběh (modrý průběh):

$$u_A = \frac{1}{3} U_{cc} + \left(U_A - \frac{1}{3} U_{cc} \right) \left(1 - e^{-t_A/\tau_{nab}} \right)$$

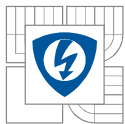
A pro maximální plyn (červený průběh):

$$u_B = \frac{1}{3} U_{cc} + \left(U_B - \frac{1}{3} U_{cc} \right) \left(1 - e^{-t_B/\tau_{nab}} \right)$$

Z rovnice pro volnoběh tedy určíme τ_{nab} :

$$\frac{2}{3} U_{cc} = \frac{1}{3} U_{cc} + \left(U_A - \frac{1}{3} U_{cc} \right) \left(1 - e^{-t_A/\tau_{nab}} \right)$$

Postupně upravíme:



$$\frac{\frac{1}{3}U_{cc}}{U_A - \frac{1}{3}U_{cc}} = 1 - e^{-t_A/\tau_{nab}}$$

$$e^{-t_A/\tau_{nab}} = 1 - \frac{\frac{1}{3}U_{cc}}{U_A - \frac{1}{3}U_{cc}}$$

$$\tau_{nab} = \frac{t_A}{\ln\left(1 - \frac{\frac{1}{3}U_{cc}}{U_A - \frac{1}{3}U_{cc}}\right)} = \frac{0,9 \text{ ms}}{\ln\left(1 - \frac{\frac{1}{3} * 5}{4,3 - \frac{1}{3} * 5}\right)} = 0,94 \text{ ms}$$

Nyní můžeme určit hodnoty součástek C_x a R_x :

C_x zvolíme 100 nF a R_x vypočteme:

$$R_x = \frac{\tau_{nab}}{C_x} = \frac{0,94 \text{ ms}}{100 \text{ nF}} = 9,4 \text{ k}\Omega \gg \text{zvolíme } 10 \text{ k}$$

Dále můžeme vypočítat asymptotickou hodnotu U_B :

$$\frac{2}{3}U_{cc} = \frac{1}{3}U_{cc} + \left(U_B - \frac{1}{3}U_{cc}\right)\left(1 - e^{-t_B/\tau_{nab}}\right)$$

$$\frac{1}{3}U_{cc} = U_B\left(1 - e^{-t_B/\tau_{nab}}\right) - \frac{1}{3}U_{cc}\left(1 - e^{-t_B/\tau_{nab}}\right)$$

$$\frac{1}{3}U_{cc} + \frac{1}{3}U_{cc}\left(1 - e^{-t_B/\tau_{nab}}\right) = U_B\left(1 - e^{-t_B/\tau_{nab}}\right)$$

$$\frac{1}{3}U_{cc}\left(2 - e^{-t_B/\tau_{nab}}\right) = U_B\left(1 - e^{-t_B/\tau_{nab}}\right)$$

$$U_B = \frac{1}{3}U_{cc} \frac{2 - e^{-t_B/\tau_{nab}}}{1 - e^{-t_B/\tau_{nab}}} = \frac{1}{3} * 5 * \frac{2 - e^{-2,1/0,94}}{1 - e^{-2,1/0,94}} = 3,5 \text{ V}$$

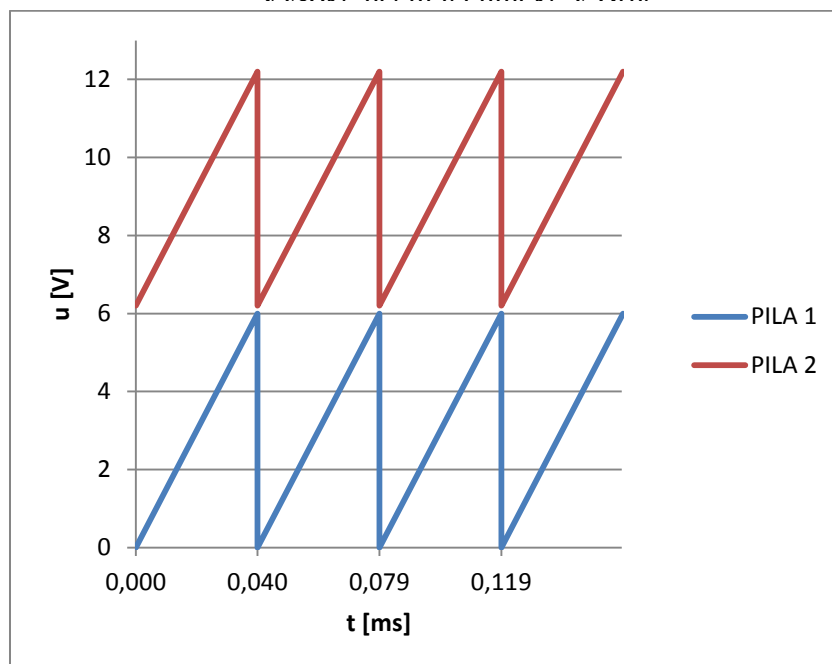
Protože perioda signálu musí být přibližně 20 ms, zvolíme dobu vypnutí $t_{vyp} = 19 \text{ ms}$. A vypočteme R_y :

$$t_{vyp} = \ln 2 * R_y * C_x$$

$$R_y = \frac{t_{vyp}}{\ln 2 * C_x} = \frac{19 \text{ ms}}{\ln 2 * 100 \text{ nF}} = 274 \text{ k}\Omega \gg \text{zvolíme } 270 \text{ k}$$

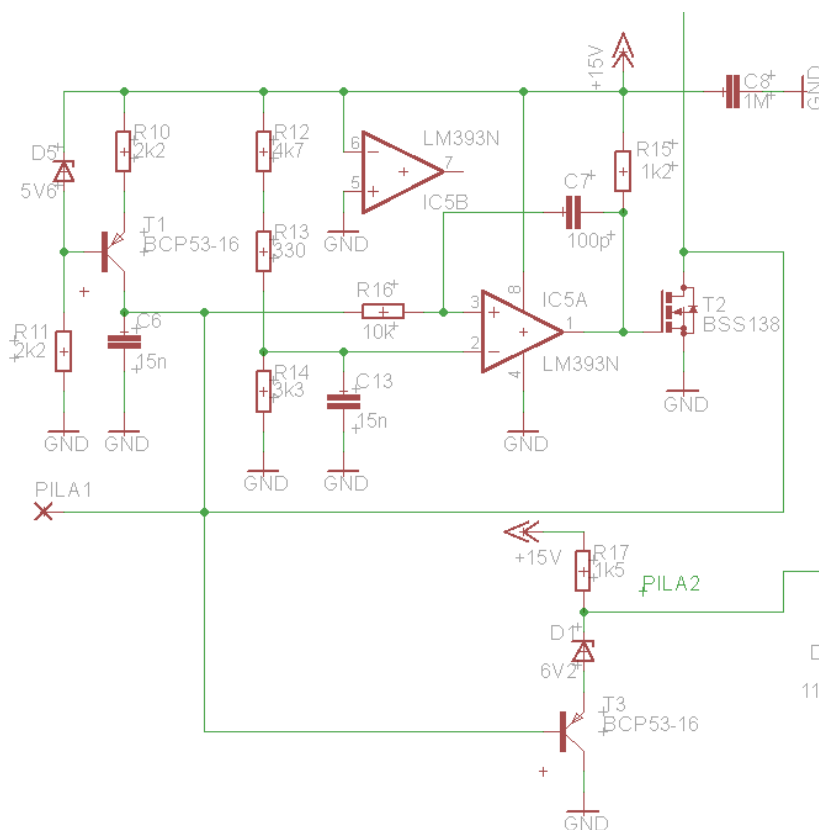
4.1.5 Vytvoření pilového průběhu pro pulzně šířkovou modulaci

V celé aplikaci potřebujeme pro tvorbu pulzně šířkové modulace pilový průběh. V našem případě je třeba první pila se špičkovou hodnotou 6 V a druhá pila se stejným tvarem, ale s offsetem 6 V. Potřebné pilovité průběhy jsou vidět na obr 15.



Obrázek 17. - Vytvořené pilovité průběhy PILA 1 a PILA 2

Zapojení generátoru pily je zřejmé z obr. 16:



Obrázek 18. - Schéma pro tvorbu pilovitého signálu

Naše zapojení využívá nabíjení kondenzátoru C_6 konstantním proudem, takže na něm lineárně narůstá napětí až do doby, kdy se výstup komparátoru nepřeklopí na napájecí napětí a nesesepne tím tranzistor T_2 . Ten jednak vybijí kondenzátor C_6 a jednak výstup generátoru PILA1 vynuluje. Kondenzátor C_6 je nabíjen proudovým zdrojem, kdy pracovní bod PNP tranzistoru T_1

je napevno nastaven děličem tvořeným z rezistoru R_{11} a Zenerovy diody D_5 . Referenční napětí komparátoru je dáno napětíovým děličem tvořeným odpory R_{12} až R_{14} tak, aby dával 6 V:

$$U_{ref} = \frac{3300}{4700 + 330 + 3300} * 15 = 5,94 \text{ V}$$

Pilový průběh PILA2 je tvořen přímo ze signálu PILA1, a to tak, že růstem napětí na kondenzátoru C_6 se přivírá PNP tranzistor T_3 a potenciál výstupu PILA2 se tak přibližuje k napájecímu napětí +15 V. Zenerova dioda D_1 tvoří zmiňovaný offset 6 V.

Výpočet frekvence pily probíhá tak, že určíme nabíjecí proud kondenzátoru:

$$i_c = \frac{U_{R10}}{R10} = \frac{5,6 - 0,6}{2200} = 2,27 \text{ mA}$$

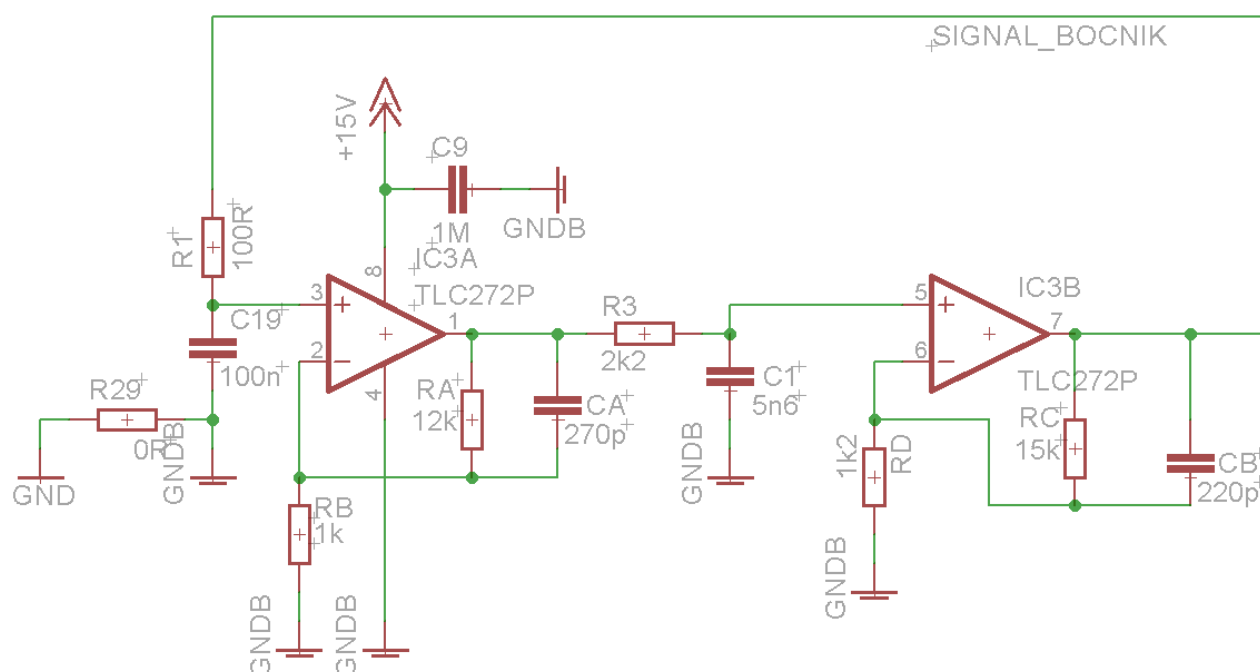
a pokud uvažujeme výšku pily 6 V, můžeme psát:

$$\Delta t = C \frac{\Delta U}{i_c} = 15 * 10^{-9} * \frac{6}{0,0022727} \cong 25,25 \text{ kHz}$$

Jedná se tedy o frekvenci mimo slyšitelnou oblast.

4.1.6 Zesilovač signálu bočníku

Napětíová úroveň signálu z bočníku se pohybuje řádově v desítkách milovoltů. Z toho důvodu bylo potřeba navrhnout zesilovač, který tuto hodnotu zvýší na potřebnou úroveň. Pro další vyhodnocování signálu potřebujeme při nejvyšší hodnotě proudu na bočníku (28 A) výstupní napětí zesilovače 8,35 V. Pro tak velké zesílení bylo třeba navrhnout dvoustupňový zesilovač. Jeho schéma je znázorněno na následujícím obrázku:



Obrázek 19. - Zesilovač signálu bočníku

Zesilovač je tedy tvořen ze dvou stupňů. Celkové zesílení je vypočteno následovně:

$$A_{uA} = 1 + \frac{R_A}{R_B} = 1 + \frac{12k}{1k} = 13$$

$$A_{uB} = 1 + \frac{R_C}{R_D} = 1 + \frac{15k}{1k2} = 13,5$$

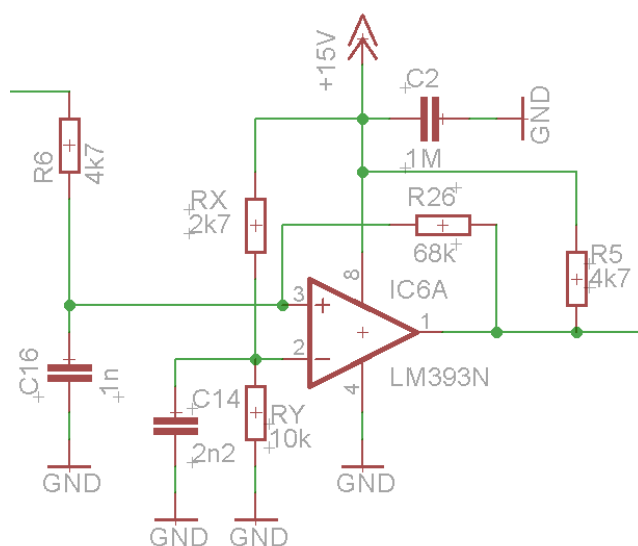
Celkové zesílení:

$$A_u = A_{uA} * A_{uB} = 13 * 13,5 = 175,5$$

Při návrhu zesilovače bylo dbáno na potlačení rušení. Proto jsou zde zapojeny dvě dolní propusti, tvořené R_1 - C_{19} a R_3 a C_1 a do zpětných vazeb jsou zapojeny kondenzátory C_A a C_B .

Dále byla zem bočnicku vyvedena co nejbližší k zesilovači pomocí koaxiálního kabelu a s hlavní zemí je spojena na jiném místě.

4.1.7 Nadproudová ochrana



Obrázek 20. – Zapojení nadproudové ochrany

Funkce nadproudové ochrany spočívá v tom, že při proudu vyšším, než je horní mez hystereze ochrany, začne ochrana spínat tranzistor T_4 (viz. Celkové schéma v příloze č. 2) a tím omezuje spínání dvojici tranzistorů T_1 a T_2 . Omezení přestane ve chvíli překročení dolní hranice hystereze. Horní mez se vypočítá ze vztahu:

$$U_h = \frac{U_{cc} \frac{R_y}{R_x + R_y}}{\frac{R_{26}}{R_6 + R_{26}}} = \frac{15 * \frac{10k}{2k7 + 10k}}{\frac{68k}{4k7 + 68k}} = 12,6 V \quad (6)$$

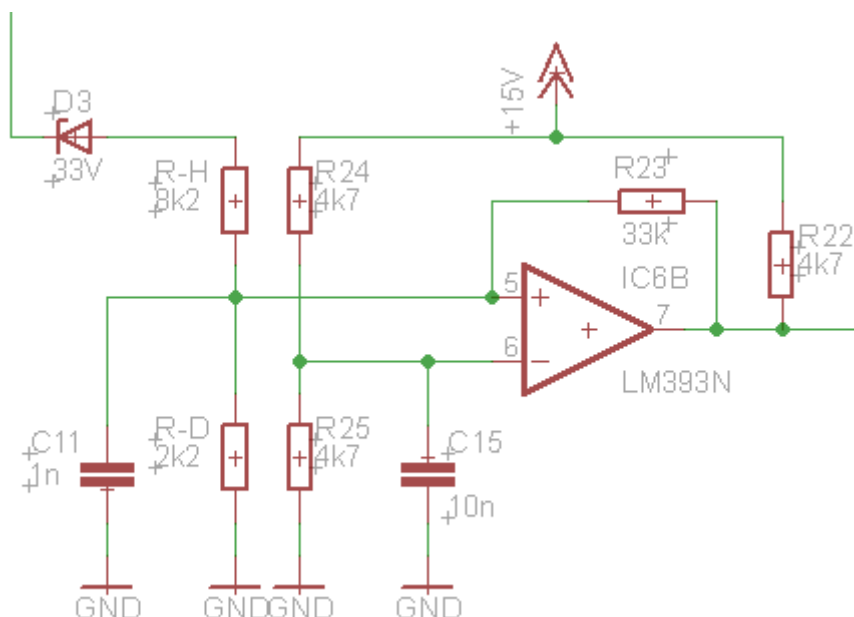
To odpovídá hodnotě proudu:

$$I_{sep} = \frac{28}{8,55} * 12,6 = 41,3 A$$

Pro vypnutí musí proud překročit hodnotu nastavenou děličem R_x - R_y , což je

$$I_{vyp} = \frac{28}{8,55} * U_{cc} * \frac{10}{2k7 + 10k} = 38,6 A$$

4.1.8 Přepět'ová ochrana



Obrázek 21. - Zapojení přepět'ové ochrany

Pro ochranu výkonové elektroniky je dále třeba přepět'ové ochrany, která pomocí tranzistoru T_5 vypne spínání dvojice výkonových tranzistorů T_7 a T_8 . Ochrana sepne při napětí, které se vypočítá takto:

$$U_{sep} = \frac{U_{cc} \frac{R_{25}}{R_{24} + R_{25}}}{\frac{R_D * R_{23}}{R_D + R_{23}} + R_H} + U_{ZD3} \quad (7)$$

$$U_{sep} = \frac{15 * 0,5}{\frac{2062,5}{2062,5 + 8200}} + 33 = 70,3 \text{ V}$$

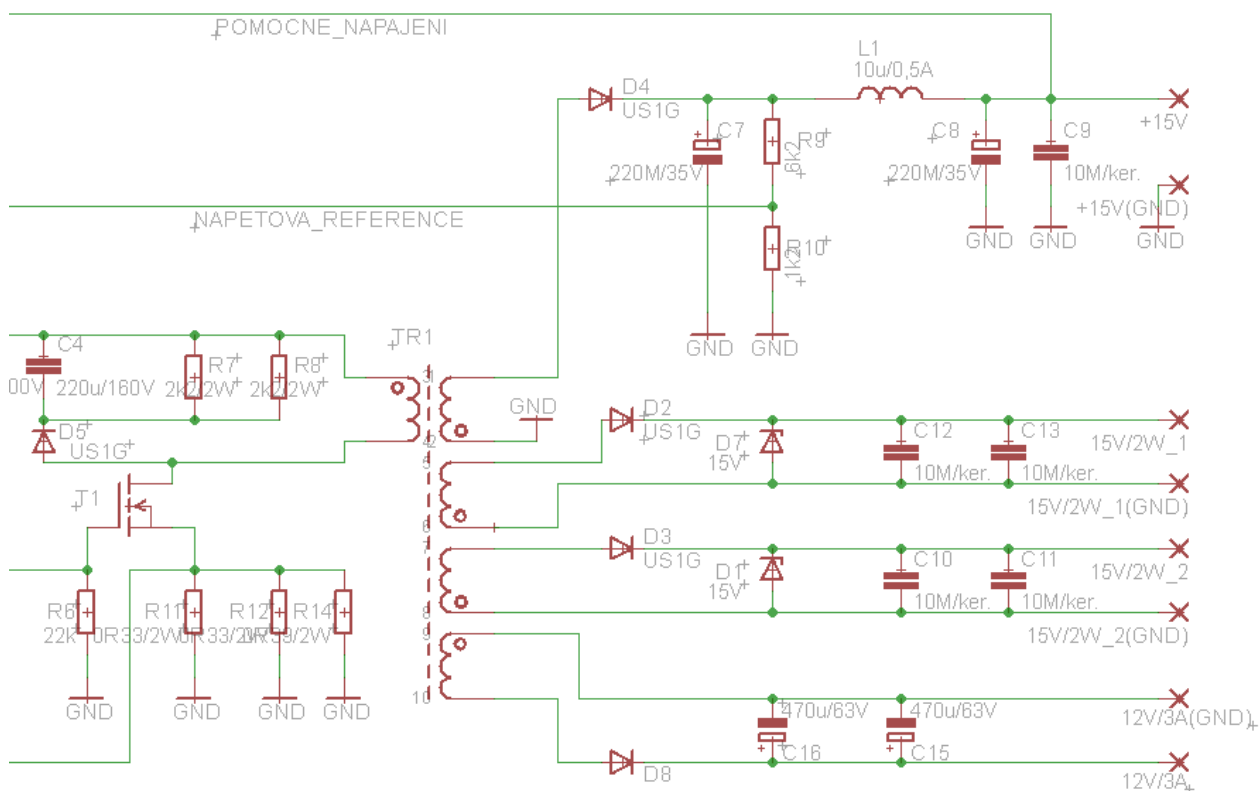
4.1.9 Měření proudu motorem

Výše uvedená nadproudová ochrana brání zvýšení proudu nad kritickou mez u výkonových tranzistorů. Díky tomu potřebuje snímat skutečný proud tranzistory a tlumivkou. Pro proudovou regulační smyčku však potřebujeme znát skutečný proud hnacím motorem, abychom měli pravdivou informaci o momentu. Ve zvyšujícím režimu totiž dvojice T_5, T_6 (viz. Schéma měniče obr. 2) není trvale sepnutá (ve vypnutém stavu proud teče pouze tlumivkou a motor se napájí pouze z kondenzátorů), výstupní kondenzátory jsou střídavě nabíjeny a vybíjeny, a tím pádem se liší proud tlumivkou a proud motorem.

Kvůli tomu byl navržen vzorkovací obvod tvořený tranzistorem T_6 buzený společně s dvojicí výkonových tranzistorů T_5, T_6 a dolní propustí R28/C4. Navzorkovaný signál je tedy následně vyhlazen a posílen obvodem IC1A a dále zpracováván regulátorem proudu.

4.1.10 Napájecí zdroj pro řídicí obvody, budiče a svétla

Pro napájení všech elektronických obvodů potřebujeme různé úrovně napětí a proudu. Dalším kritériem je, že některé obvody musí galvanicky oddělené od ostatních obvodů a to hlavně budiče výkonových tranzistorů. Nejnáročnější pro celkový návrh napájecího zdroje byl výpočet cívky zdroje, díky které bude toto galvanické oddělení realizováno.



Obrázek 22. - Zapojení blokujícího měniče s transformátorem

V našem případě bylo využito zapojení blokujícího měniče s transformátorem. Hlavní spínací větev měniče tvoří primární cívka transformátoru, tranzistor T_1 a bočníky R_{11} a R_{12} . Přes diodu D_5 se vybíjí vysoké překmity (způsobené rozptylovou indukčností cívky) do kondenzátoru C_4 a ten se pak postupně vybíjí přes odpory R_7 a R_8 .

Výpočet bočníků R_{11} a R_{12} . Uvažujeme, že na vstupu obvodu UC3844 bude 1V při maximálním proudu tranzistoru 5,7 A:

$$R_{11} + R_{12} = \frac{1V}{5,7 A} = 175,4 m\Omega \quad (8)$$

Bočníky jsou dva paralelně

$$\frac{R_{11} + R_{12}}{2} = \frac{175,4 m\Omega}{2} = 87,7 m\Omega \quad (9)$$

Zvoleny 2 ks odporů 0R33/2W. Při ožiování byl dodán ještě další odpor 0R39/2W, protože se ukázalo, že proudová ochrana zdroje spíná příliš brzy.

Určení hodnot odporů R_7 a R_8 . Výpočet je proveden tak, že uvažujeme celé napětí na výstupu na počítaných odporech vynásobené převodem. Max. možné napětí na výstupu bylo uvažováno 16 V a převod transformátoru $N_1/N_2 = 2,13$. Výkonová ztráta na jednom odporu bude počítána 2 W:

$$U_{2,max} * \frac{N_1}{N_2} = 16 * 2,13 = 34,08 \text{ V} \quad (10)$$

$$R_7 + R_8 = \frac{34,08^2}{1 \text{ W}} = 175,4 \text{ m}\Omega \quad (11)$$

Stabilní napěťová úroveň napájecího napětí 15 V je zajišťována porovnáváním výstupního napětí z bočníku s napěťovou referencí 2,5 V uvnitř obvodu UC3844. Obvod tedy bude měnit střidu spínání tranzistoru tak, aby na svém měřicím vstupu vždy 2,5 V.

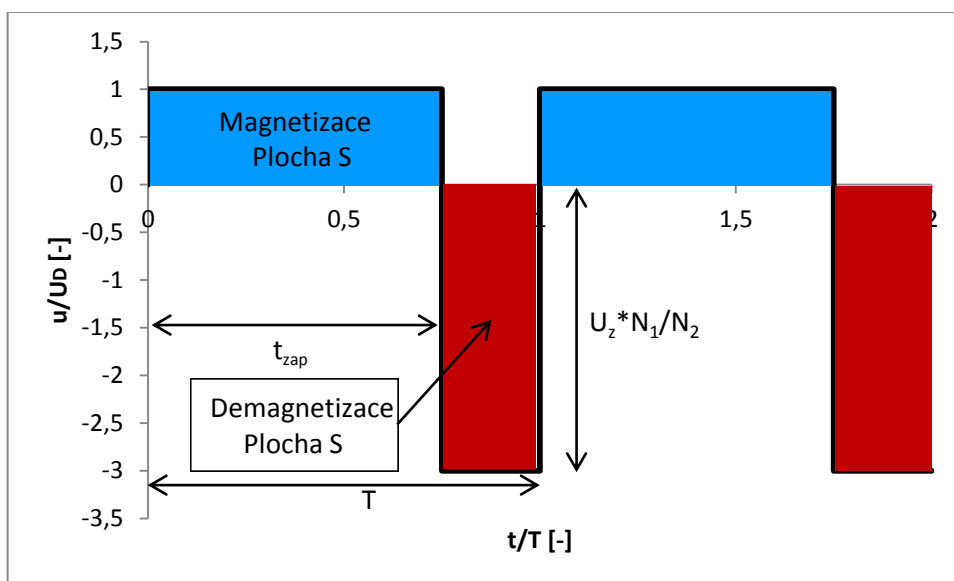
Výstup transformátoru tvoří 4 cívky. Horní cívka je začátkem vynutí připojená přes diodu na vyhlazovací kondenzátor a odporový dělič, ze kterého je měřeno napětí pro zpětnou vazbu mikročipu. Dále je toto napětí vyhlazeno cívkou L_1 a kondenzátory C_8 a C_9 . Napětím +15 V se napájí všechny řídicí obvody kromě světel.

Druhý a třetí výstup 15V/2W byl původně navržen pro napájení galvanicky oddělených budičů výkonových tranzistorů T_1 a T_3 . Ty však po výrobě DPS zdroje nebyly osazeny, protože se podařilo opravit zdroj pro budiče na desce s výkonovým měničem.

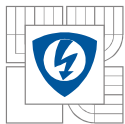
Nakonec čtvrtý výstup 12V/3A napájí vnější osvětlení kola.

Funkce blokujícího měniče

Nejprve je třeba naznačit funkci blokujícího měniče s transformátorem. V době, kdy je tranzistor sepnut (t_{zap}), probíhá magnetizace jádra pomocí primární cívky transformátoru. Ve schématu je vidět, že začátky sekundárních vinutí jsou postaveny tak, aby při magnetizaci jádra bylo na anodách blokovacích diod záporné napětí, takže jsou zavřené, a zátěže jsou tedy napájené pouze z kondenzátorů. V okamžiku, kdy se spínací tranzistor zavře, se začne jádro transformátoru demagnetovat přes sekundární cívky tak, že diody jsou polarizovány v propustném směru a zátěž je napájena díky demagnetizaci. Z diagramu (obr. 18) je patrné, že plocha „S“ při magnetizaci i demagnetizaci jádra musí být stejná, jinak by docházelo k přesycování jádra.



Obrázek 23. - Magnetizace a demagnetizace transformátoru blokujícího měniče

**Návrh napájecího zdroje**

Výpočet bude prováděn pro čtvrtou sekundární cívku 12V/3A, která má největší odběr. Nejprve budeme vycházet z následující rovnice pro zapnutý stav (viz. Obr 18):

$$U_D * t_{zap} = U_z \frac{N_1}{N_2} (T - t_{zap}) \quad / * \frac{1}{T}$$

$$U_D * s = U_z \frac{N_1}{N_2} (1 - s)$$

$$U_z = U_d \frac{s}{1 - s} \frac{N_2}{N_1}$$

Vyjádříme střidu:

$$U_D * s = U_z \frac{N_1}{N_2} - U_z \frac{N_1}{N_2} s$$

$$U_D * s + U_z \frac{N_1}{N_2} s = U_z \frac{N_1}{N_2}$$

$$s = \frac{U_z \frac{N_1}{N_2}}{U_D + U_z \frac{N_1}{N_2}}$$

Z rovnice pro namáhání tranzistoru při vypnutí můžeme určit převod transformátoru. Nejhorší stav může nastat při maximálním napětí generátoru:

$$U_{CE,max} = U_{D,max} + U_z \frac{N_1}{N_2}$$

Převod tedy bude:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_{CE,max} - U_{D,max}}{U_z}$$

$U_{CE,max}$ zvolíme 90 V a dosadíme do rovnice:

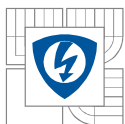
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{90 - 58}{15} = 2,13$$

Nyní již můžeme určit rozsah střídý:

$$s_{max} = \frac{U_z \frac{N_1}{N_2}}{U_{D,min} + U_z \frac{N_1}{N_2}} = \frac{15 * 2,13}{13 + 15 * 2,13} = 0,711$$

$$s_{min} = \frac{U_z \frac{N_1}{N_2}}{U_{D,max} + U_z \frac{N_1}{N_2}} = \frac{15 * 2,13}{58 + 15 * 2,13} = 0,355$$

Výpočet $I_{1,max}$, $I_{1,min}$, $I_{2,max}$ a $I_{2,min}$:



Dále je třeba vypočítat proud vinutím primárního i sekundárního vinutí. Vyjdeme z rovnice pro definici indukčnosti:

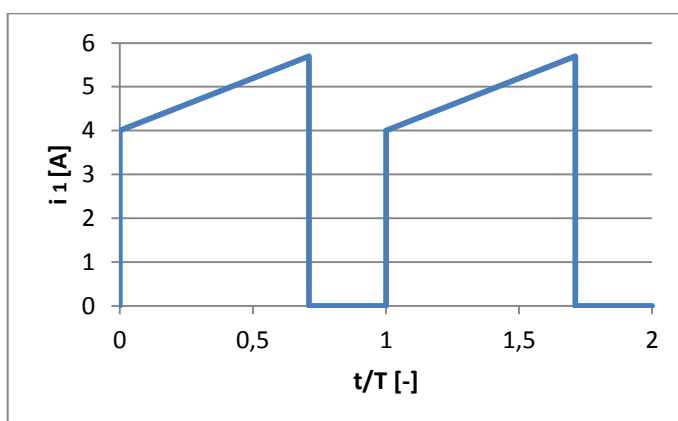
$$N\Phi = LI$$

$$\Phi_{max} = \frac{L_1 I_{1,max}}{N_1} = \frac{L_2 I_{2,max}}{N_2}$$

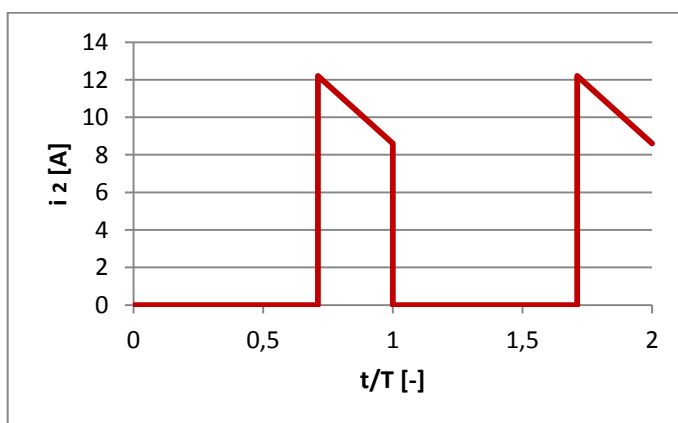
$$\frac{N_1^2 \lambda I_{1,max}}{N_1} = \frac{N_2^2 \lambda I_{2,max}}{N_2}$$

$$N_1 I_{1,max} = N_2 I_{2,max}$$

Pro další návrh je vhodný diagram proudů v obou vinutích pro s_{max} :



Obrázek 24. - Proud primární cívky transformátoru

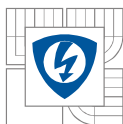


Obrázek 25. - Proud sekundární cívky transformátoru

Střední hodnota proudu sekundární cívky nebo-li proud zátěže I_z :

$$I_{2,stř} = \frac{I_{2,max} + I_{2,min}}{2} (1 - s) = I_z$$

Dále zvolíme zvlnění proudu sekundární cívky při s_{max} : $\Delta I_2 = I_{2,max} - I_{1,max} \cong 30\% I_{2,max}$



$$I_z = \frac{2 * I_{2,max} - \Delta I_2}{2} (1 - s) = \frac{2 * I_{2,max} - 0,3 * I_{2,max}}{2} (1 - s)$$

$$I_z = 0,85 * I_{2,max} * (1 - s)$$

Vyjádříme $I_{2,max}$:

$$I_{2,max} = \frac{I_z}{0,85 * (1 - s)} = \frac{3}{0,85 * (1 - 0,711)} = 12,2 \text{ A}$$

A výpočet $I_{1,max}$ a $I_{1,min}$:

$$I_{1,max} = \frac{I_{2,max}}{\frac{N_1}{N_2}} = \frac{12,2}{2,13} = 5,7 \text{ A}$$

$$I_{1,min} = I_{1,max} - 0,3 * I_{1,max} = 0,7 * 5,7 = 4 \text{ A}$$

Výpočet potřebné indukčnosti L_1 :

V době zapnutí platí následující vztah pro proud primární cívky:

$$i_1(t) = I_{1,min} + \frac{1}{L_1} \int u_1(t) dt = I_{1,min} + \frac{U_D * t}{L_1}$$

Maximální hodnota proudu I_1 se tedy dá vypočítat jako součet počáteční hodnoty $I_{1,min}$ a hodnoty, která se naintegruje za dobu zapnutí tranzistoru t_{zap} :

$$I_{1,max} = I_{1,min} + \frac{U_D * t_{zap}}{L_1}$$

A konečně indukčnost primární cívky pro s_{max} a $U_{D,min}$ (pro výpočet byla zvolena spínací frekvence 100 kHz):

$$L_1 = \frac{U_D * T * s_{max}}{I_{1,max} - I_{1,min}} = \frac{13 * 10^{-5} * 0,711}{5,7 - 4} = 63 \mu\text{H}$$

Zde můžeme provést kontrolu ΔI_1 při s_{min} :

$$\Delta I_1 = \frac{U_{D,max} * T * s_{min}}{L_1} = \frac{58 * 10^{-5} * 0,355}{63 * 10^{-6}} = 3,3 \text{ A}$$

$$I_{1,stř} = \frac{I_{1,max} + I_{1,min}}{2} = \frac{U_z * I_z}{U_{D,max}} = \frac{12 * 3}{58} = 0,62 \text{ A}$$

Návrh počtu závitů pro nepřesycení:

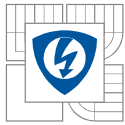
Pro magnetickou indukci při zapnutí platí:

$$B(t) = B_{poč} + \frac{1}{N_1 S_{Fe}} \int u_1(t) dt = \frac{L_1 I_{1,min}}{N_1 S_{Fe}} + \frac{1}{N_1 S_{Fe}} * U_D * t$$

$$B(t) \leq B_{max} = 0,3 \text{ T}$$

$$B_{max} = \frac{L_1 I_{1,min}}{N_1 S_{Fe}} + \frac{1}{N_1 S_{Fe}} * U_{D,min} * T * s_{max}$$

$$B_{max} = \frac{1}{N_1 S_{Fe}} (L_1 I_{1,min} + U_{D,min} * T * s_{max})$$



Odtud můžeme vyjádřit potřebný počet závitů primární cívky:

$$N_1 = \frac{1}{B_{\max} S_{Fe}} (L_1 I_{1,\min} + U_{D,\min} * T * S_{\max})$$

Vypočteme průřez jádra:

$$S_{Fe} = \frac{D^2}{4} * \pi = \frac{9,5^2}{4} * \pi = 70,88 \text{ mm}^2$$

Dosadíme:

$$N_1 = \frac{1}{0,3 * 70,88 * 10^{-6}} (63 * 10^{-6} * 4 + 13 * 10^{-5} * 0,711) \cong 16 \text{ závitů}$$

A počet závitů sekundární cívky:

$$N_2 = \frac{N_1}{\frac{N_1}{N_2}} = \frac{16,2}{2,13} \cong 8 \text{ závitů}$$

Při s_{\min} bude situace pro B_{\max} ještě příznivější, protože $I_{1,\max}$ je v tomto případě $3,3 + 0,1 = 3,4 \text{ A}$, což je méně než při s_{\max} ($U_{D,\min}$) $I_{1,\max} = 5,7 \text{ A}$. Střídavý zdvih B tu však bude naopak vyšší, protože $\Delta I_1 = 3,3 \text{ A}$ při s_{\min} , zatímco při s_{\max} byl jenom $5,7 - 4 = 1,7 \text{ A}$.

Návrh vzduchové mezery

Pro magnetickou vodivost platí:

$$\lambda = \frac{L_1}{N_1^2}$$

A dále (pro jádro uvažujeme $\mu_r \rightarrow \infty$):

$$\lambda = \mu_0 \frac{S_{Fe}}{l_v}$$

Z těchto dvou vztahů můžeme tedy vyjádřit délku vzduchové mezery:

$$l_v = \frac{\mu_0 S_{Fe}}{L_1} N_1^2 = \frac{4\pi * 10^{-7} * 70,88 * 10^{-6}}{63 * 10^{-6}} * 16^2 = 0,362 \text{ mm}$$

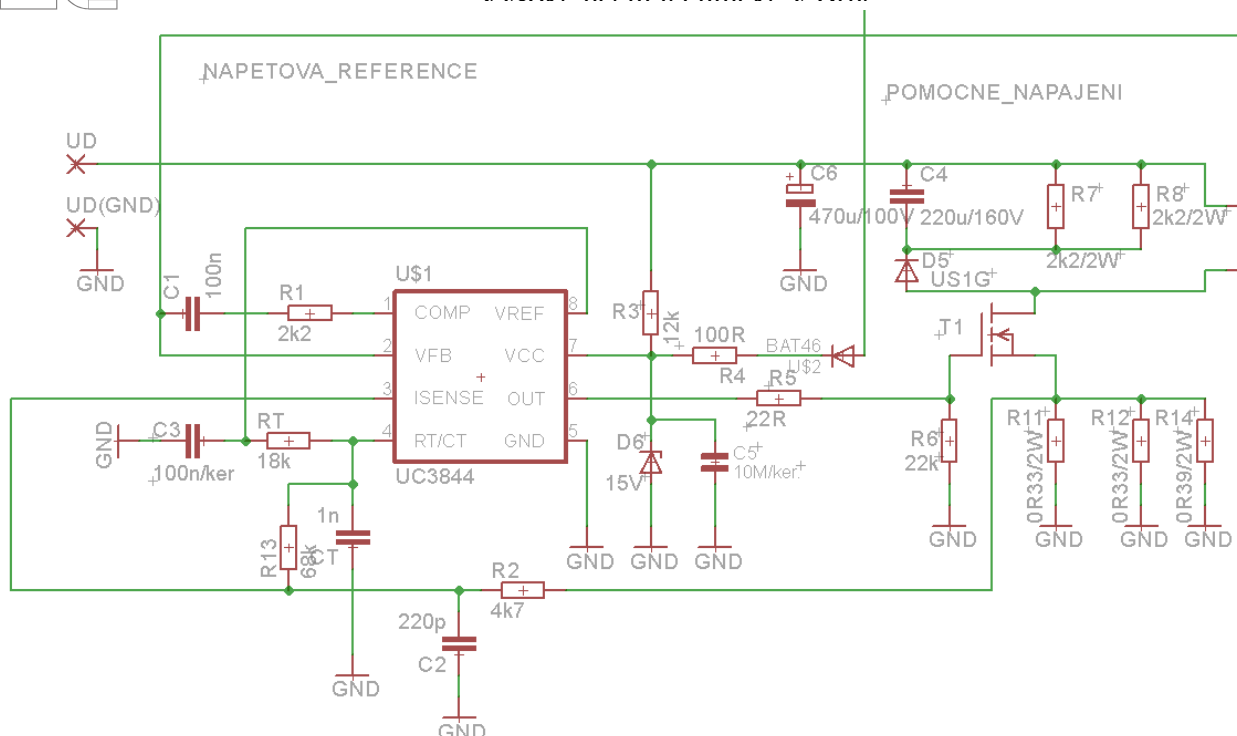
A polovina vzduchové mezery:

$$l_{v,1/2} = 0,181 \text{ mm}$$

Do magnetického obvodu byly vloženy 2 kusy ustřiženého papírku, který má tloušťku 0,2 mm.

4.1.11 Řízení napájecího zdroje

K řízení spínání tranzistoru byl vybrán PWM kontroler UC3844 [5]. Jeho napájení v této aplikaci je ztíženo tím, že nepracuje s konstantním napětím meziobvodu, ale musí být schopno pracovat v rozsahu napětí od 13 V do 58 V. K tomu slouží dělič jednak R_3 , D_6 , který zajišťuje napájení při napětí větším než je 15 V a dále je z výstupu +15V přiváděno napětí přes diodu U_2 a odpor R_4 naopak pro případ, kdy je napětí nižší než 15 V. Frekvence PWM kontroleru je nastavena součástkami R_T a C_T na hodnotu 100 kHz.

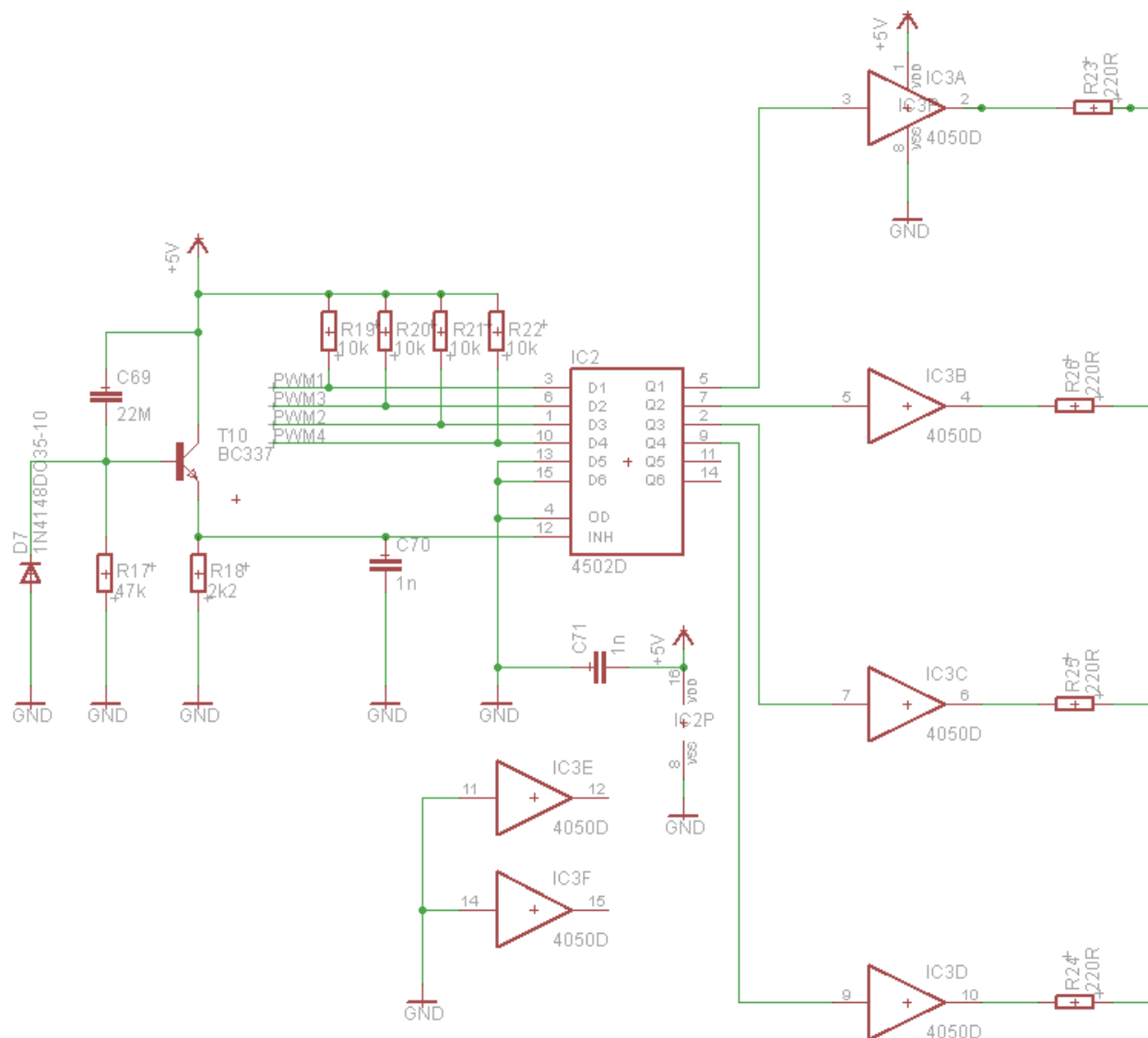


Obrázek 26. - Schéma zapojení spínání tranzistoru

4.1.12 Úpravy na desce s výkonovým měničem

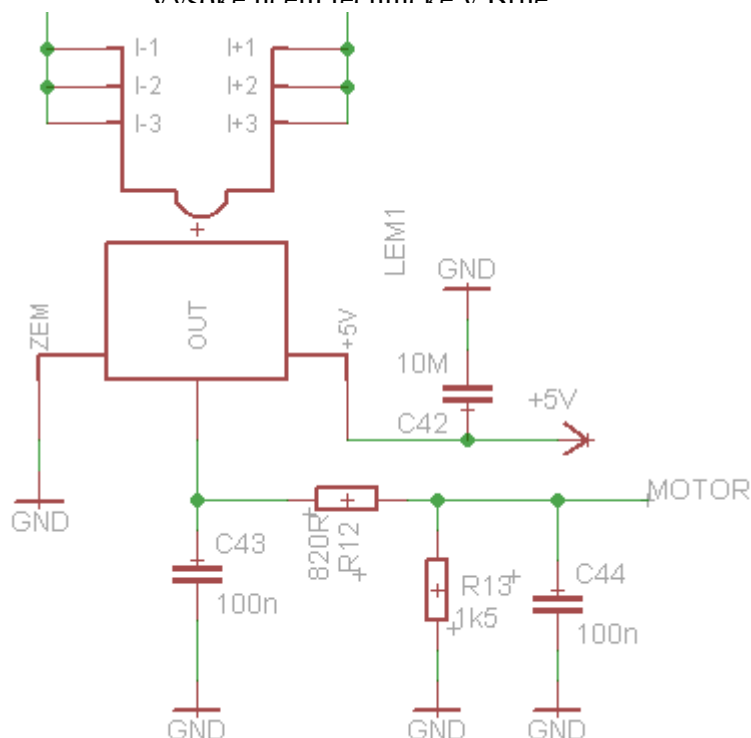
Pro aktuální použití bylo třeba provést poměrně rozsáhlé změny na desce plošných spojů s výkonovým měničem. Signál PWM pro výkonové tranzistory je nyní tvořen na nové desce, takže bylo třeba ho dovést k až budičům, které byly ponechány. Výhoda těchto změn byla hlavně v tom, že nebylo potřeba navrhovat a vyrábět nový měnič. Původní kompletní schéma zapojení zmiňované desky je vidět v přílohách č. 4 a 5. Byly provedeny následující změny, které byly v této práci uspořádány do 11 bodů.

- 1) Byl odstraněn integrovaný obvod IC2 (4050) a byly následně propojeny jeho původní vstupy s příslušnými výstupy.
- 2) Byly odstraněny Pull-up rezistory R₁₉, R₂₀, R₂₁ a R₂₂.
- 3) Odstraněn obvod IC1 (4502) a opět propojeny jeho původní vstupy s příslušnými výstupy.



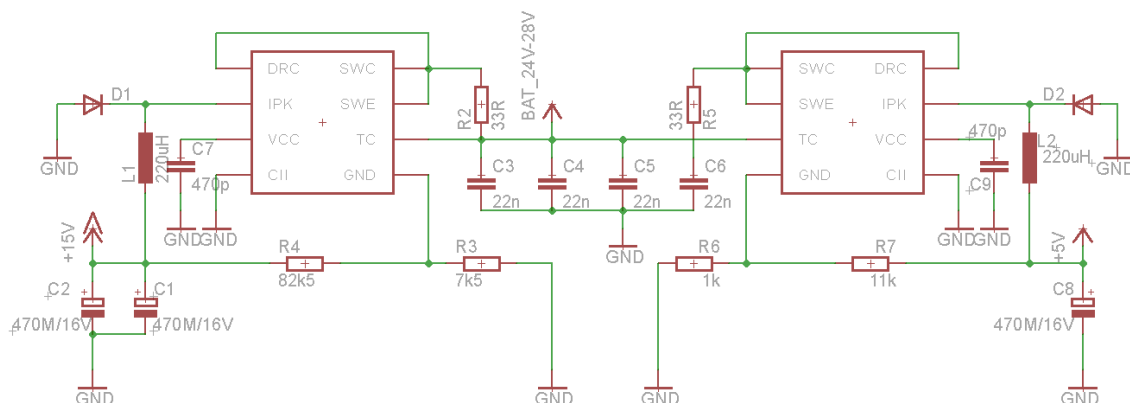
Obrázek 27. - Odstraněný obvod (platí pro body 1 až 5)

- 4) Dále byly odstraněny součástky okolo tranzistoru T₁₀ včetně.
- 5) Odstraněny odpory R₂₃ až R₂₆, které byly nahrazeny nulovými odpory se stejným pouzdrem.
- 6) Odstraněno čidlo LEM (a okolní obvody), které bylo nahrazeno bočnickem s odporem 1,7 mΩ.



Obrázek 28. - Odstraněné čidlo LEM (bod 6)

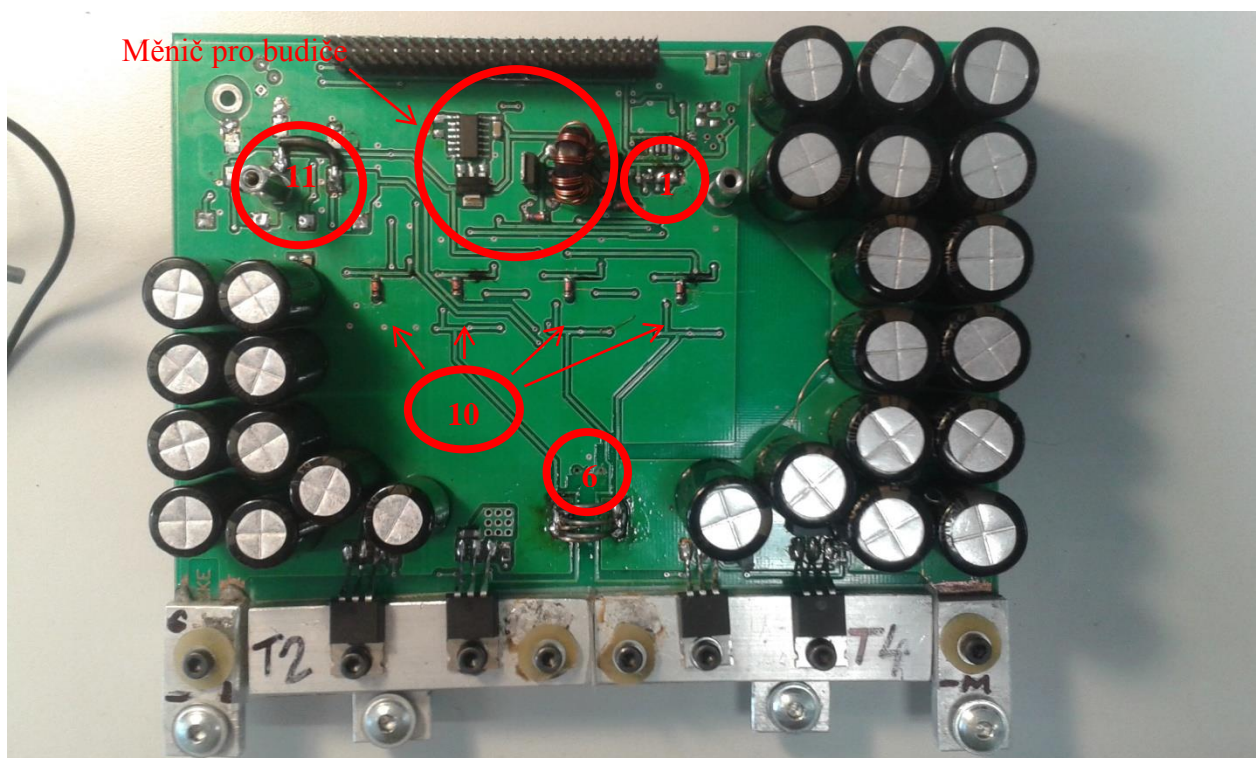
- 7) Signál bočníku (signál + zem) byl vyveden koaxiálním kabelem na příslušné piny konektoru, který propojuje desku měniče s deskou řízení (viz. Obr. 31).
- 8) Dále bylo třeba na zmiňovaný konektor vyvést napětí motoru (U_{mot}) a napětí za usměrňovačem (U_D). To bylo provedeno dvojlinkovým vodičem (červená + bílá barva izolace) na příslušné piny (viz. Obr. 31).
- 9) Byly odstraněny snižovače s MC33063.



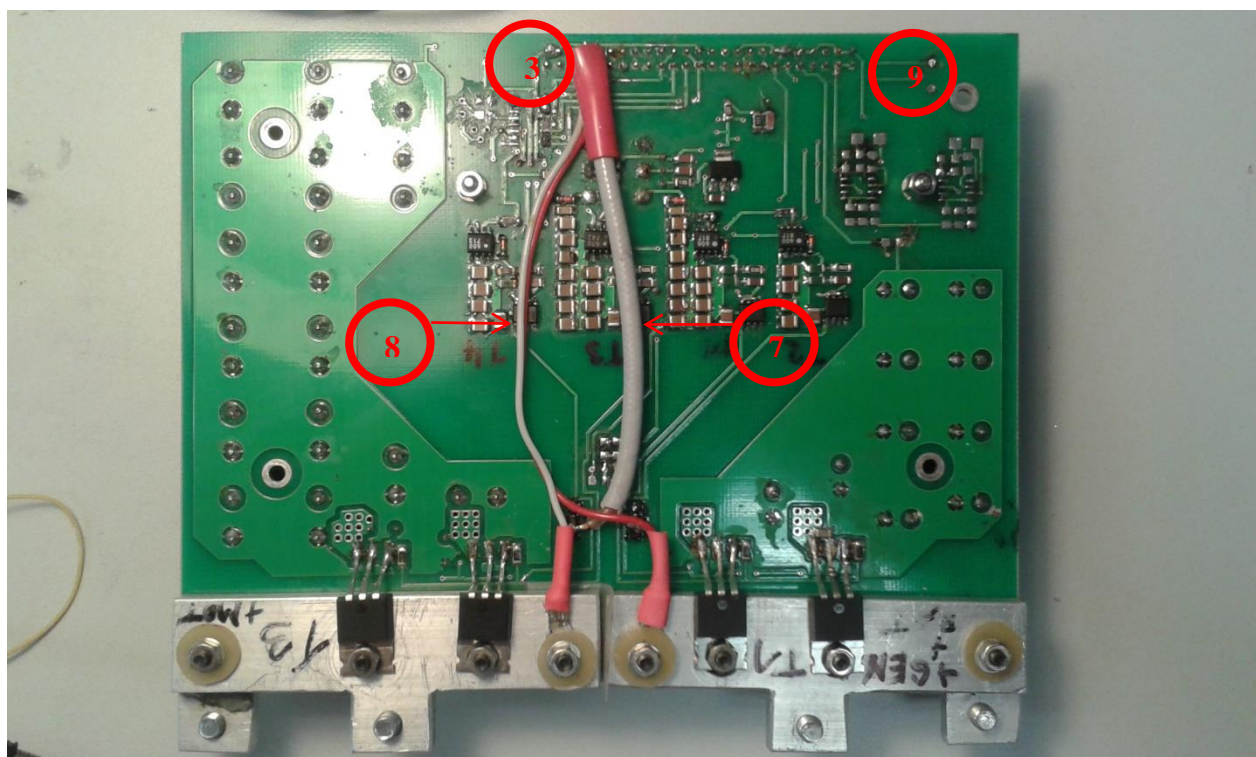
Obrázek 29. - Odstraněné snižovače s MC33063(bod 9)

- 10) Do obvodů budičů výkonových tranzistorů byly dodány obvody pro realizaci odskoků, aby nedocházelo ke zkratu mezi výkonovými tranzistory.
- 11) A nakonec bylo třeba kompletně projít cestu signálu PWM k budičům a cestu napájení a provést dodatečné úpravy.

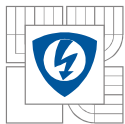
Výsledné úpravy jsou vidět na obrázcích 30 a 31. Měníč pro galvanicky oddělené napětí 15V pro budiče byl ponechán a znovu opraven a oživen. Díky tomu nejsou ve výše zmiňovaném pomocném zdroji (kap. 3.2.9) osazeny původně navržené výstupy 15V/2W.



Obrázek 30. - Upravená deska s měničem - vrchní pohled



Obrázek 31. - Upravená deska s měničem - spodní pohled



4.1.13 Návrh bočníku

Pro návrh uvažujeme odpor bočníku $1,7 \text{ m}\Omega$ a bylo třeba bočník připájet na místo, odkud bylo vyjmuto čidlo LEM. Bočník musel tedy být rozměrově velmi malý. Pro tyto potřeby byl vybrán Konstantanový drát s měrným odporem $6,2 \text{ m}\Omega/\text{cm}$. Bylo určeno, že bočník bude tvořit 6 drátů paralelně, takže je možné psát:

$$R_{\Sigma} = 1,7 * 6 = 10,2 \text{ m}\Omega$$

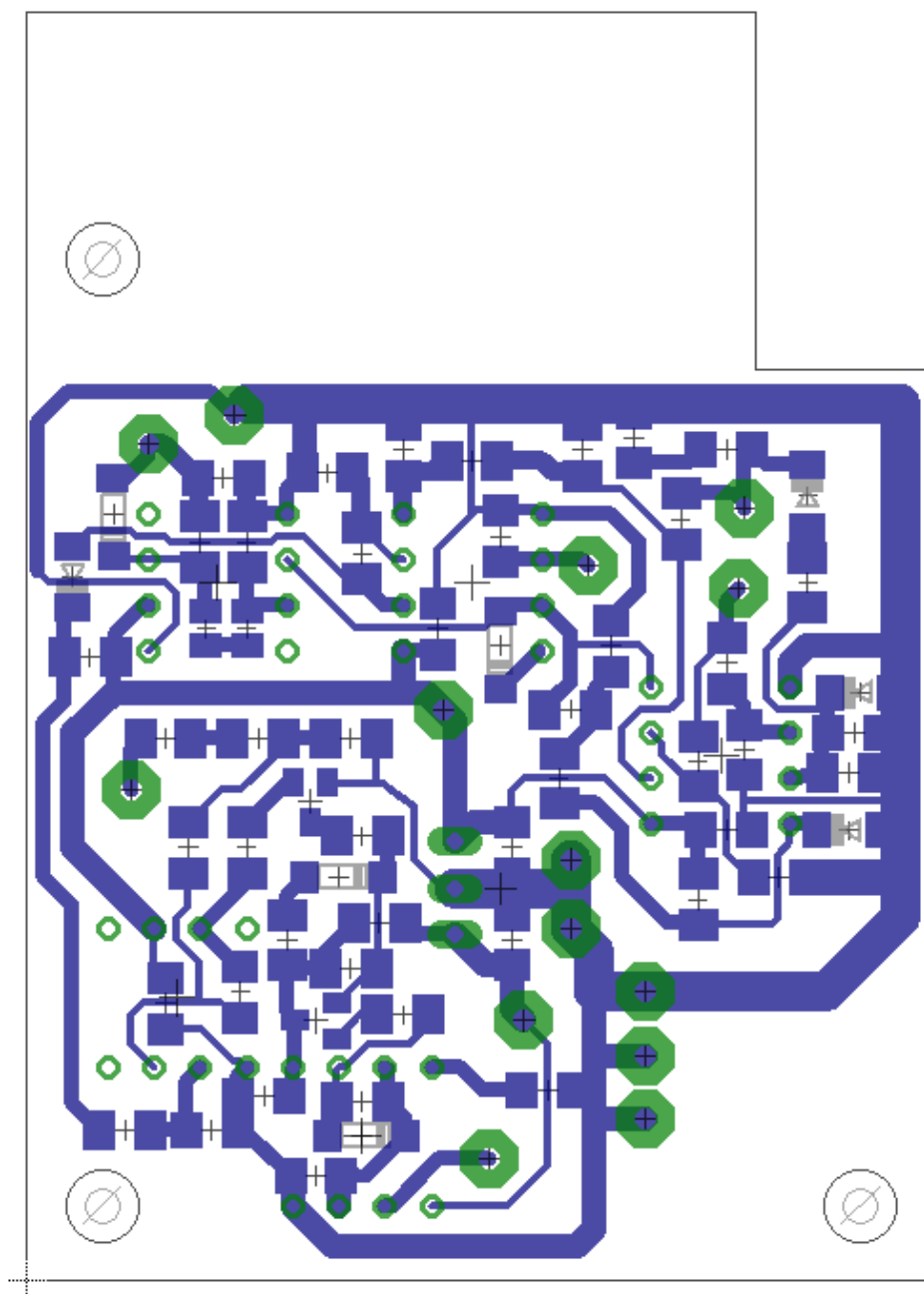
A výpočet délky jednoho drátu byl:

$$\frac{10,2}{6,2} = 1,65 \text{ cm}$$

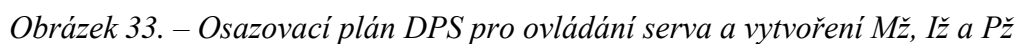
5 REALIZACE NAVRŽENÝCH OBVODŮ

5.1 Deska pro řízení serva ovládající škrticí klapku

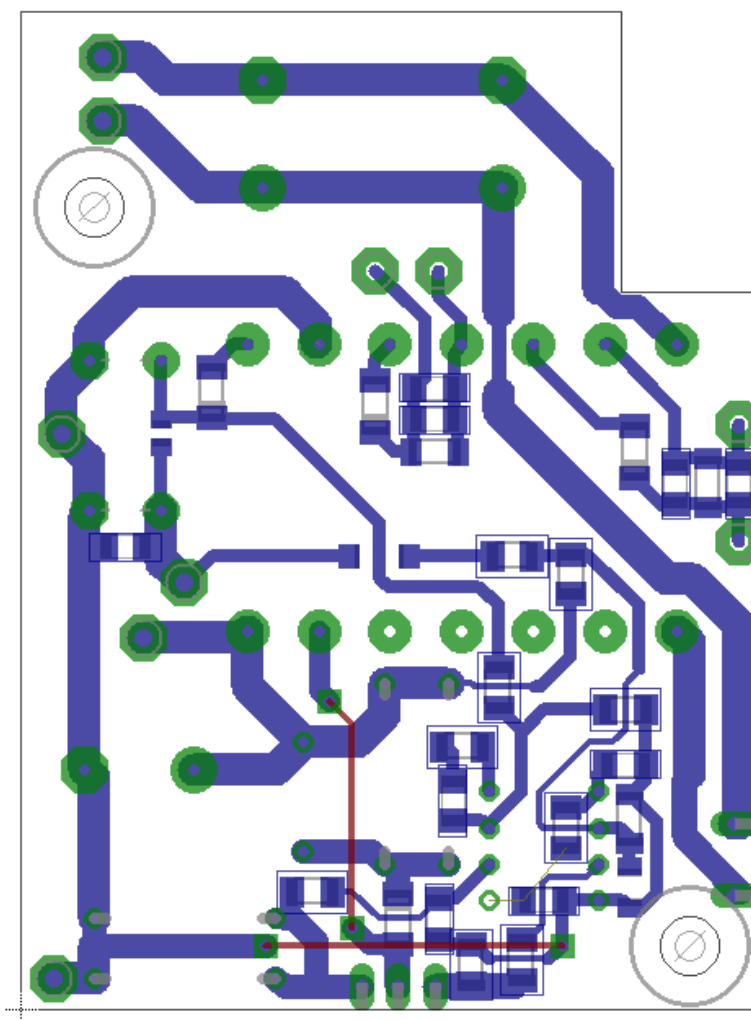
Pro přesně odladění obvodu muselo být nejprve zjištěno, na jaký úhel se musí servo natočit. Po té bylo servo připojeno k obvodu a obvod byl napájen napětím 15 V z laboratorního zdroje. Při experimentech bylo odhaleno, že dioda U1 musí být nahrazena nulovým odporem, protože se tranzistor T2 nedostatečně otevřel a obvod pak negeneroval správnou délku pulzů. Dále musel být bovden přemontován do správného otvoru vrtulky servo. Layout a osazovací plán je vidět na obrázcích 32 a 33:



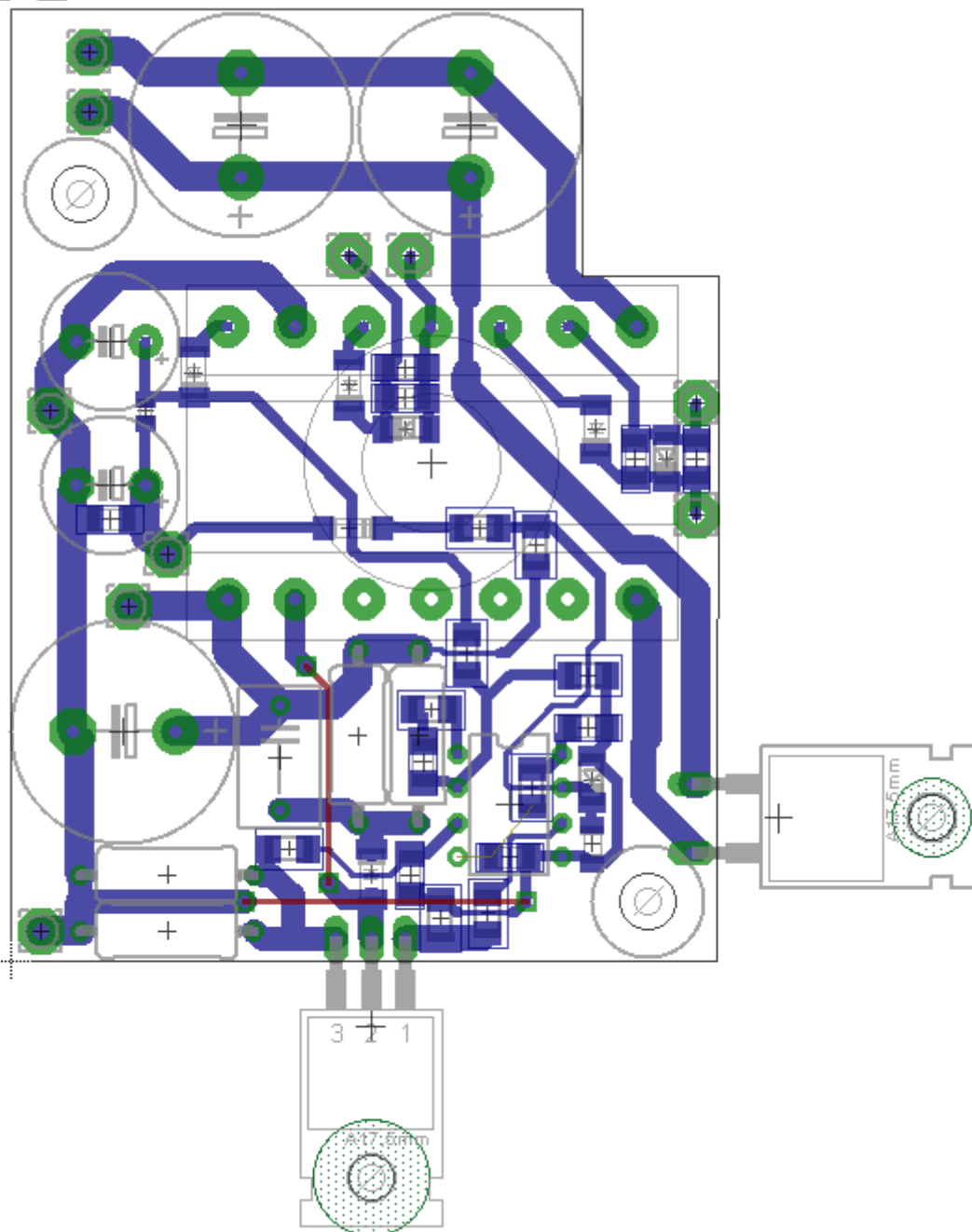
Obrázek 32. - Layout DPS pro ovládání serva a vytvoření Mž, Iž a Pž



Layout DPS pomocného zdroje je na obr. 34:



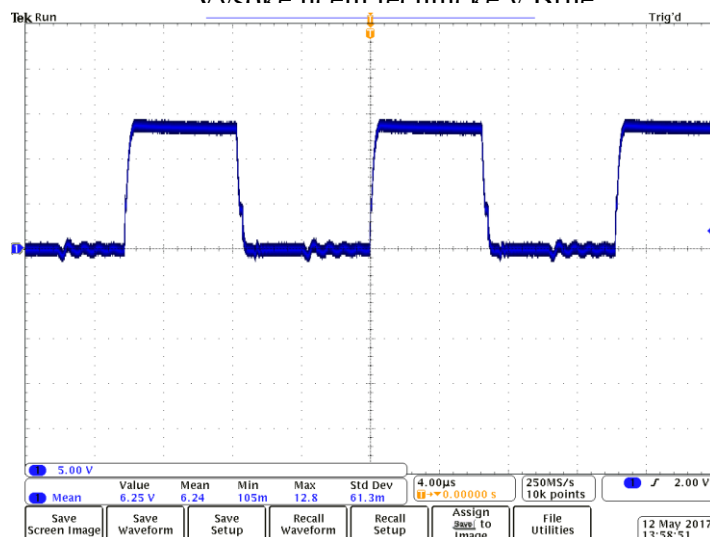
Obrázek 34. - Layout DPS pomocného zdroje



Obrázek 35. - Osazovací plán DPS pomocného zdroje

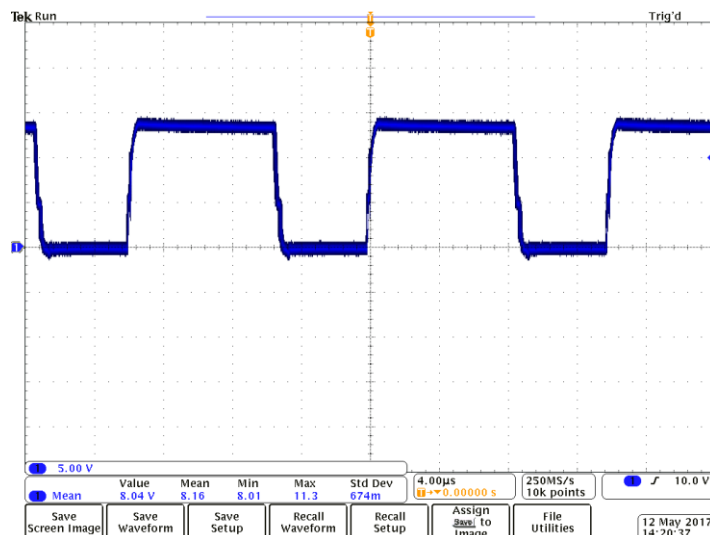
U pomocného zdroje budeme používat výstup 15 V, který by měl dodávat cca 150 mA a výstup 12/3A. Priorita je výstup 15 V, protože musí napájet veškeré řídicí obvody a musí být tedy stabilní a bez rušení.

Zdroj začíná pracovat při úrovni napájecího napětí asi 17 V. Při nižším napětí je rozběh doprovázen nechtěnými zvukovými efekty, které jsou generovány závitů transformátoru. Dále byl na výstup 15 V připojen odpor, který trvale odebíral 250 mA, při kterém zdroj pracoval stabilně. Je tedy zaručena dostatečná rezerva proudového odběru. Průběh napětí na gate spínacího tranzistoru je vidět na obr. 34:

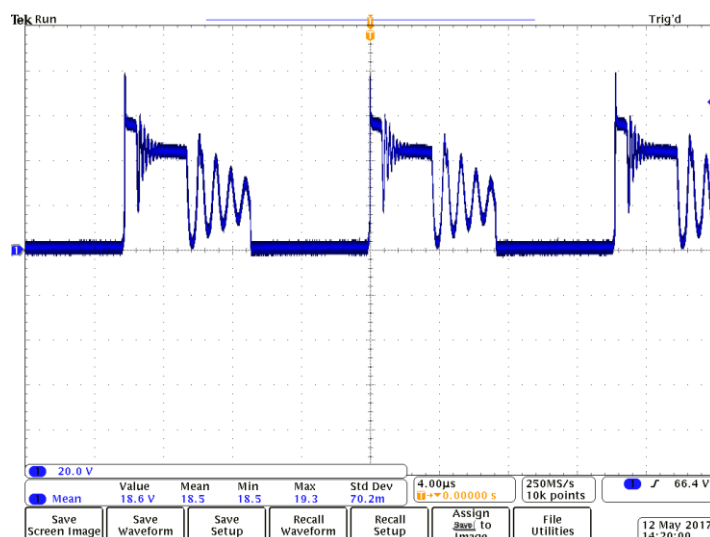


Obrázek 36. - Průběh napětí na gate spínacího tranzistoru bez žárovky

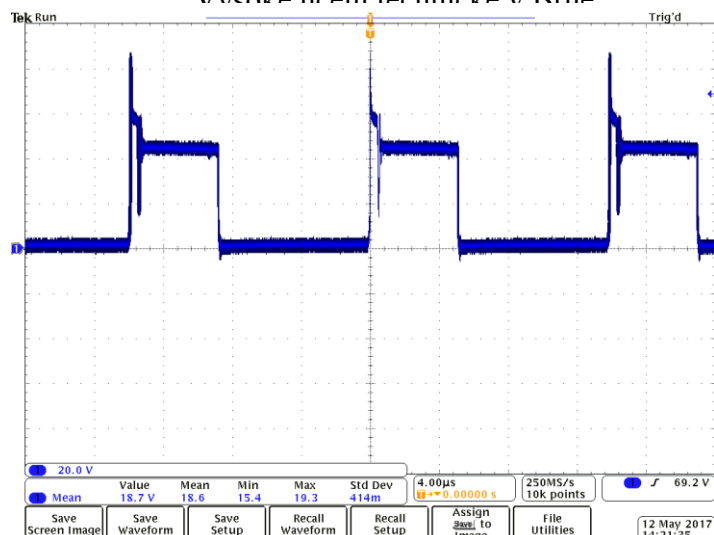
Po připojení žárovky 12V/21W na výstup 12V/3A vypadá průběh na gate takto:



Obrázek 37. - Průběh napětí na gate spínacího tranzistoru s připojenou žárovkou



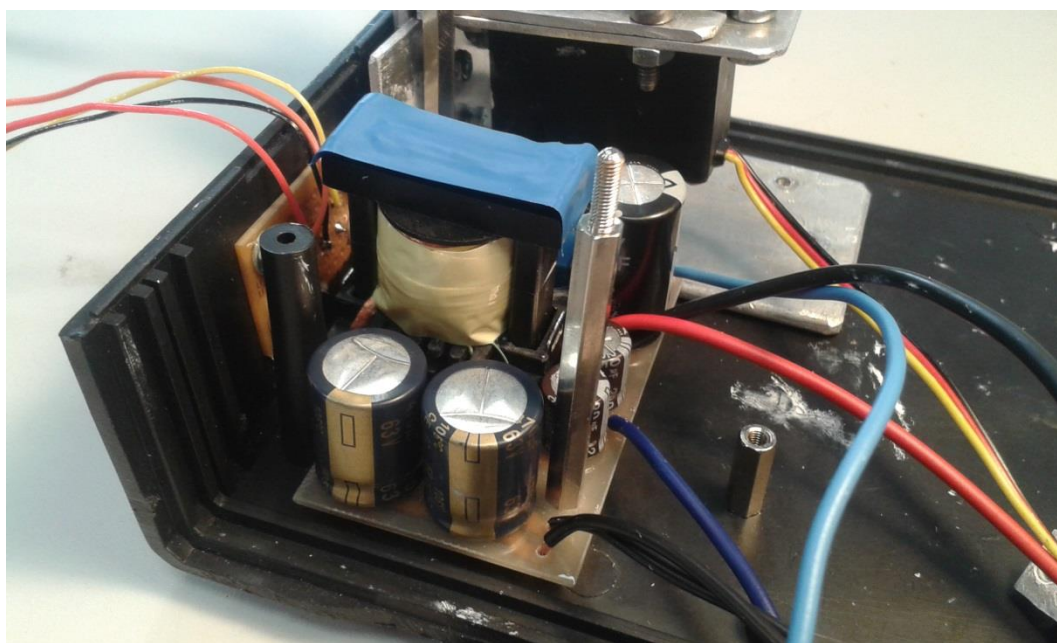
Obrázek 38. - Průběh na drainu spínacího tranzistoru bez žárovky



Obrázek 39. - Průběh na drainu spínacího tranzistoru s připojenou žárovkou

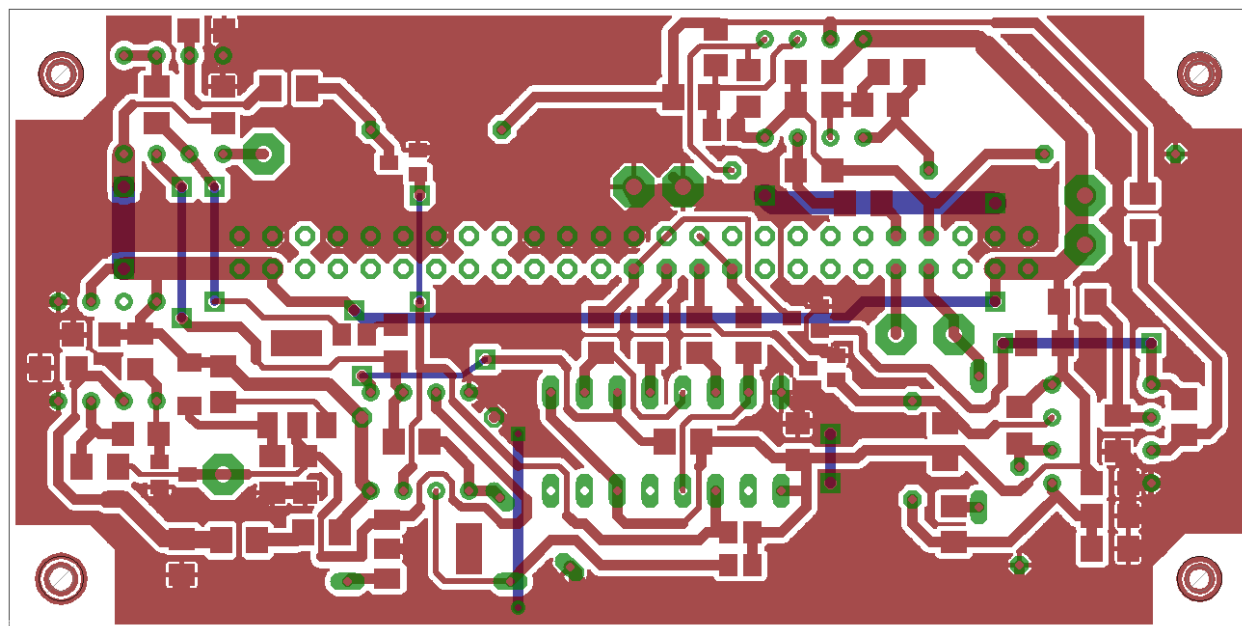
Při připojení řídicí desky pro servo se objevuje kmitání (s připojenou žárovkou), které vzniká snahou serva se natočit do výchozí polohy. To způsobuje poklesy napětí a servo se natočí do jiné nedefinované polohy. Po opětovném náběhu napětí se proces opakuje. Důvodem je zřejmě příliš velký odběr žárovky a po její výměně za 12V/10W se tato chyba již neprojevuje. Z toho plyne omezení zátěže na vnější osvětlení kola na 10W, které však je dostačující. Pro ještě větší stabilitu zdroje bude před žárovku umístěn teplotně závislý odpor NTC, který omezí náběh proudu při zapnutí osvětlení a na zdroji tím pádem nebude klesat napětí.

Výsledný vzhled osazené a namontované desky pomocného zdroje je na obr. 38:

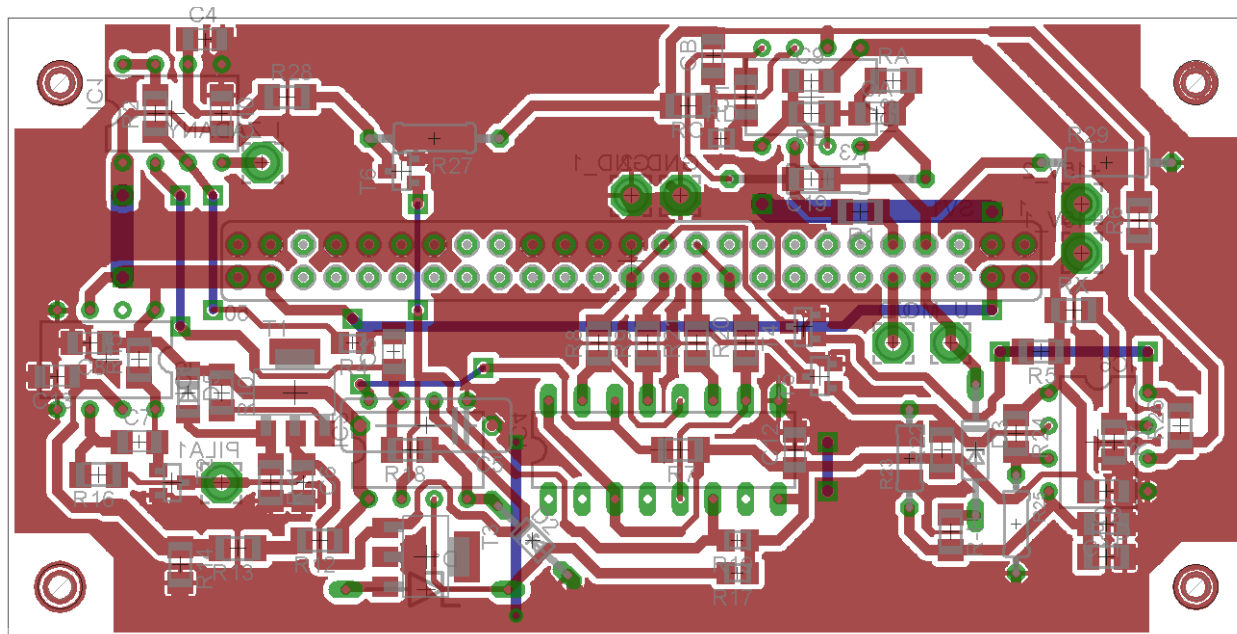


Obrázek 40. - Osazená DPS pomocného zdroje namontovaná v plastové krabici

5.3 Deska s řízením výkonových tranzistorů a vytvořením pily

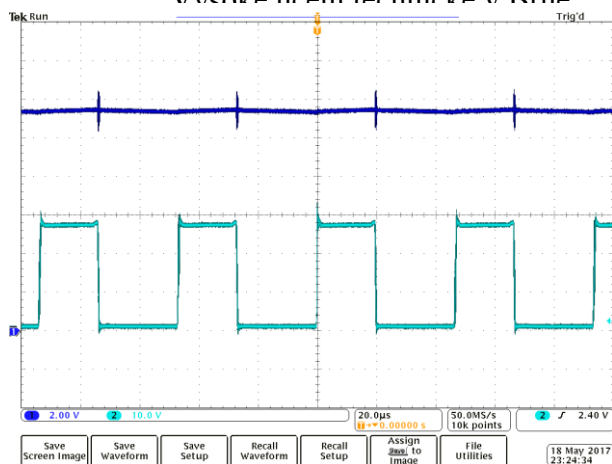


Obrázek 41. - s řízením výkonových tranzistorů a vytvořením pily

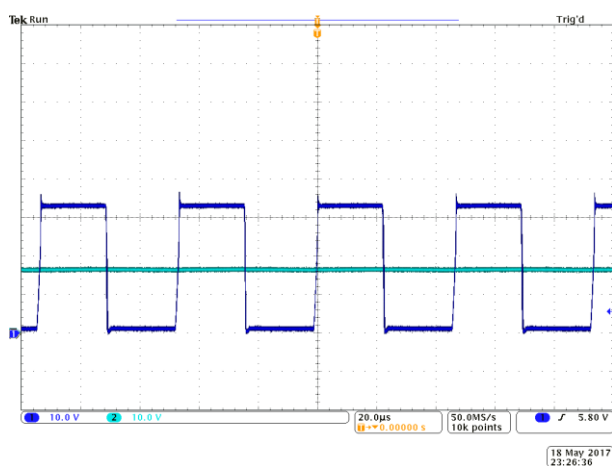


Obrázek 42. - Osazovací plán s řízením výkonových tranzistorů a vytvořením pily

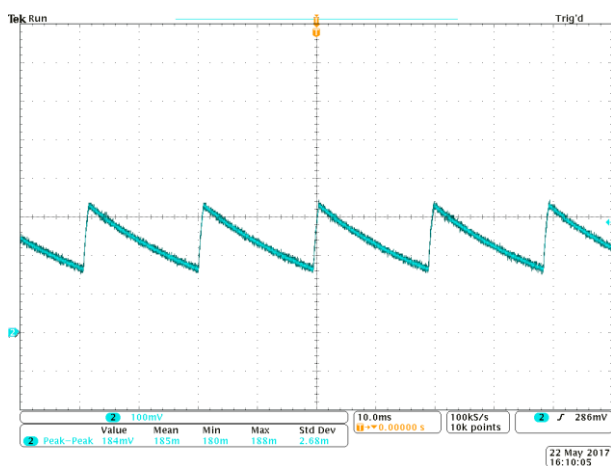
U ožiování této desky bylo třeba ověřit funkci přepětové a nadproudové ochrany, dále ověřit zesílení zesilovače bočníku a ověřit funkci generaci pily a signálu PWM. Průběhy napětí u_x a u_y jsou na obrázcích níže:



Obrázek 43. - Průběh napětí u_x na tranzistorech T3 a T4



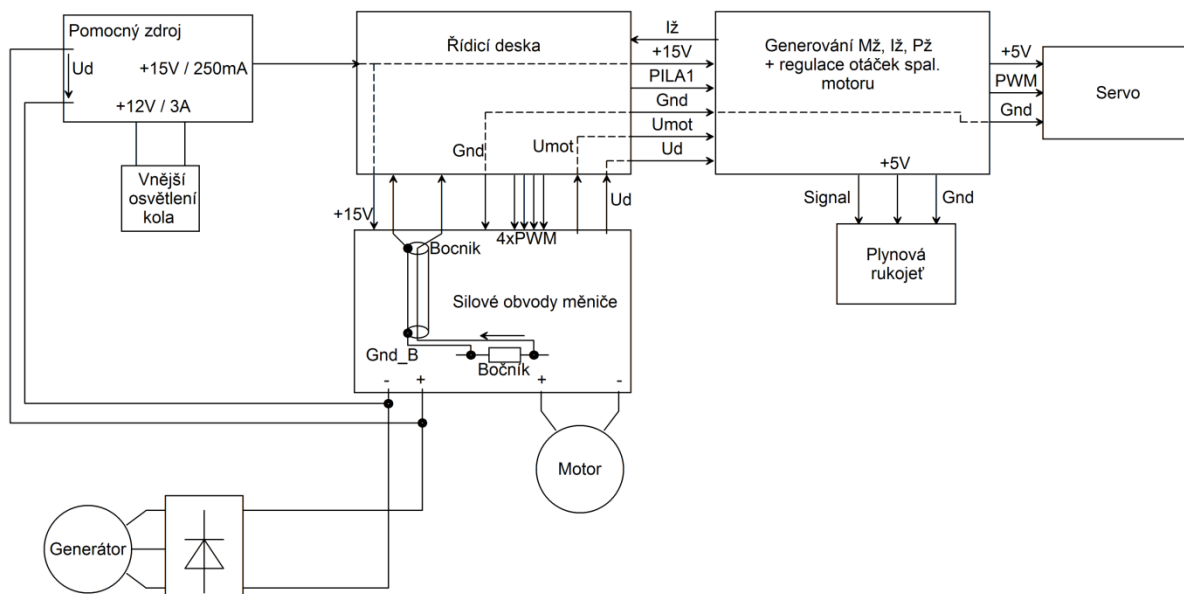
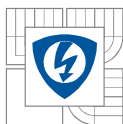
Obrázek 44. - Průběh napětí u_y na tranzistorech T7 a T8



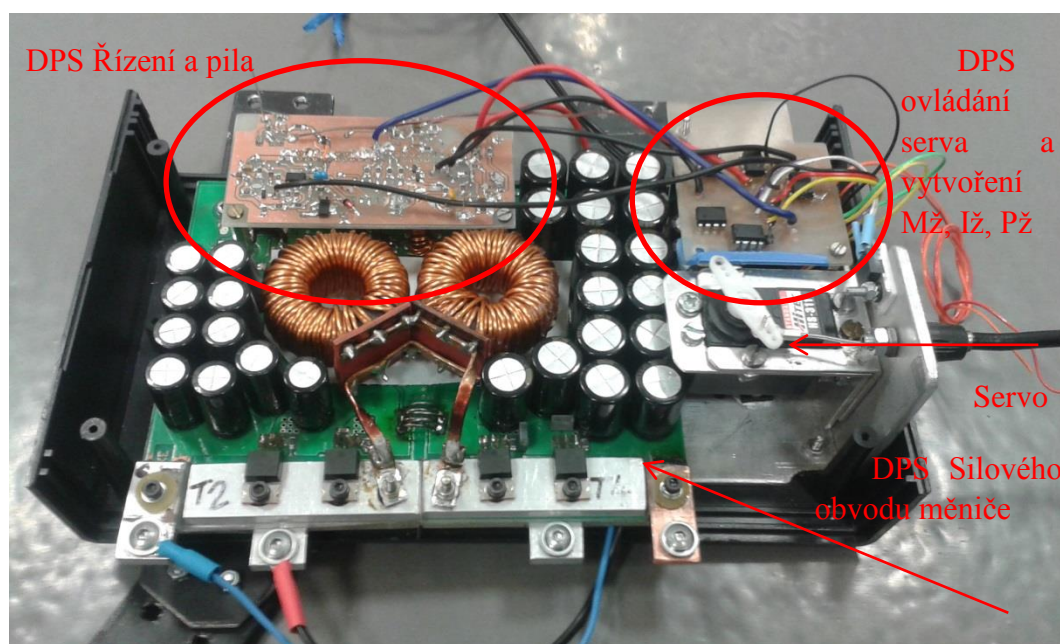
Obrázek 45. - Průběh nabíjení a vybíjení kondenzátoru C_x

5.4 Kompletní montáž elektroniky

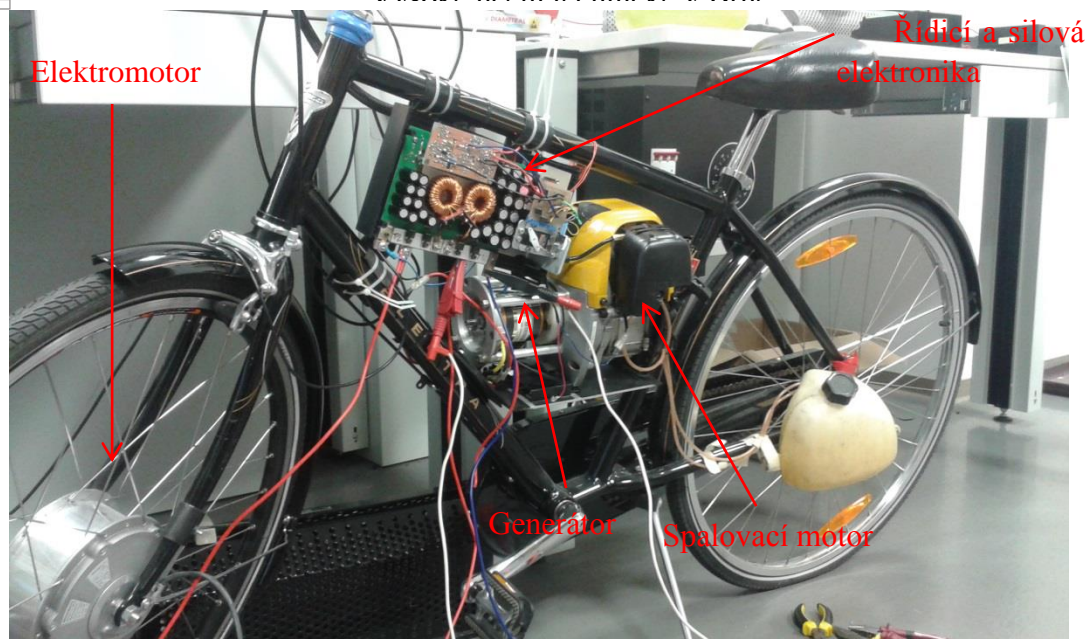
Kompletní blokové schéma zapojení jednotlivých desek je na obr. 46:



Obrázek 46. - Blokové schéma propojení všech desek



Obrázek 47. - Fotografie kompletně osazené krabice s řídicí i výkonovou elektronikou

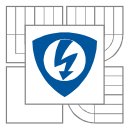


Obrázek 48. - Elektronika namontovaná v kole při oživování

6 JÍZDNÍ VLASTNOSTI KOLA

Bylo provedeno několik zkušebních jízd po rovné silnici a do kopce. Na rovné silnici je po nabrání rychlosti patrné ubírání plynu na spalovacím motoru vlivem snižování úrovně žádaného výkonu.

Jízda do kopce prokázala dostatečnou sílu elektropohonu i bez nutnosti šlapání.



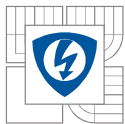
ZÁVĚR

V této práci byla nejprve popsána koncepce jízdního kola se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu. Bylo popsáno blokové schéma, které znázorňuje propojení jednotlivých dílčích obvodů a jejich vzájemnou vazbu.

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout řídicí algoritmus pro řízení jízdního kola se spalovacím motorem a elektrickým přenosem výkonu s ohledem na co nejnížší spotřebu spalovacího motoru. Dále bylo třeba navrhnout vhodné elektrické obvody pro realizaci řízení.

Po návrhu desek plošných spojů bylo třeba desky osadit. To proběhlo úspěšně i s následným oživením desek i s dokumentací jejich funkce.

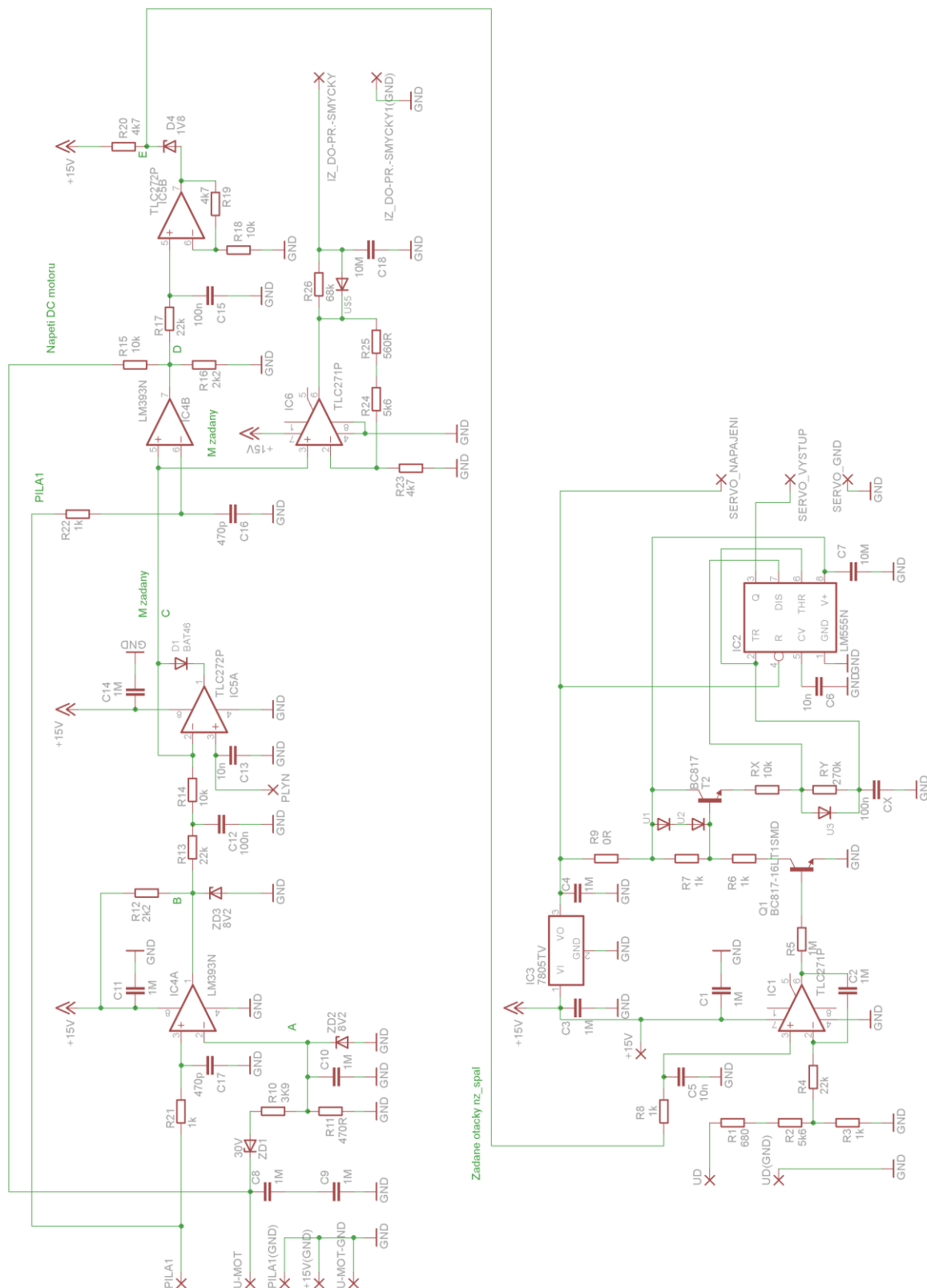
Dále byla provedena montáž všech komponent do rámu kola byly provedeny zkušební jízdy.

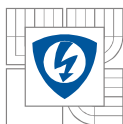


LITERATURA

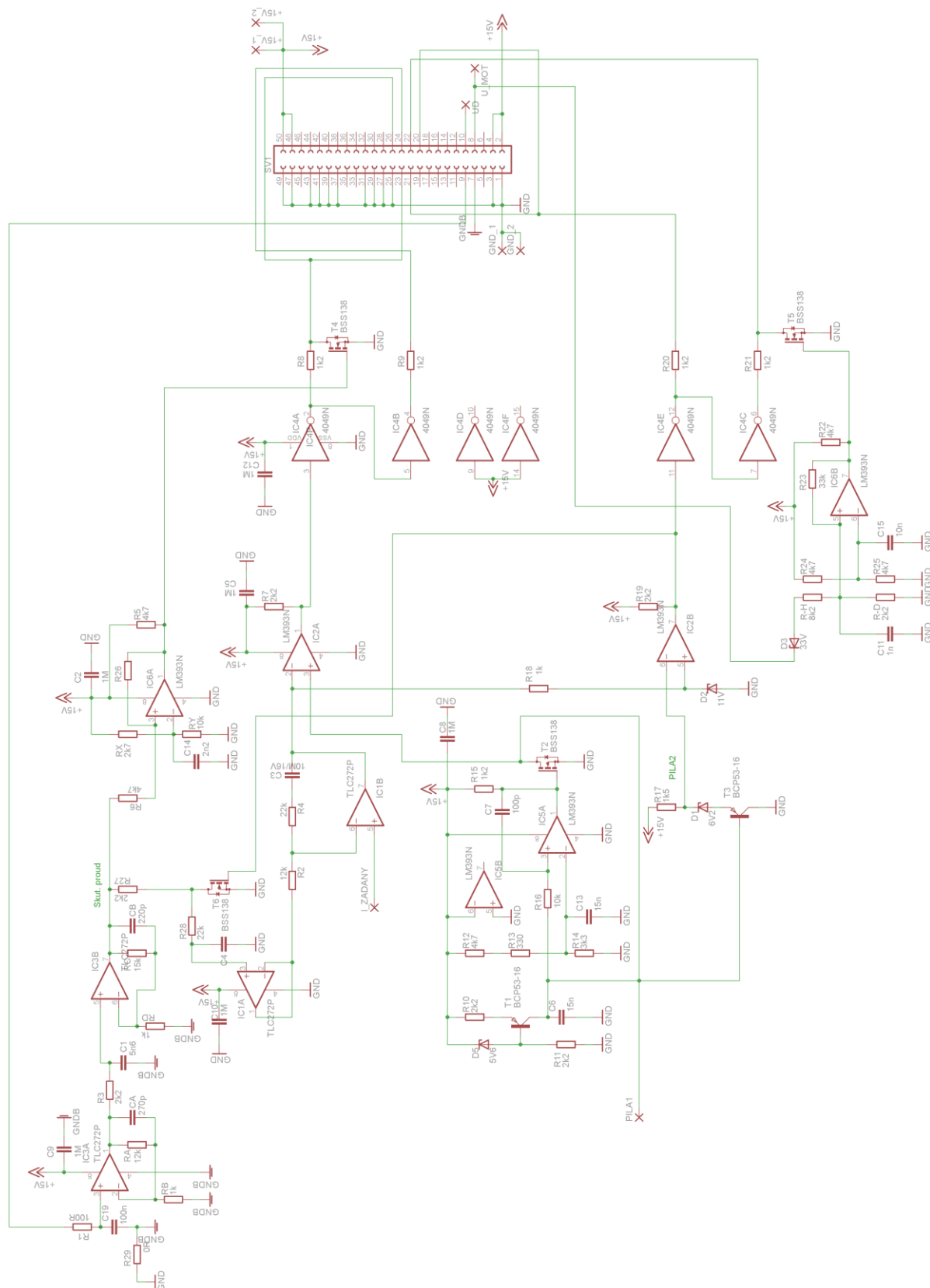
- [1] P. Vorel, P. Procházka: Řídicí členy v elektrických pohonech (skriptum VUT Brno)
- [2] M. Patočka: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice
- [3] Vlastislav Novotný, Pavel Vorel, Miroslav Patočka: Napájení elektronických zařízení
- [4] MIČKA, D. *Jízdní kolo s elektrickým motorem a benzinovou elektrocentrálou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 58 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D..
- [5] *SERVICE MANUAL EH025/EH035 ENGINE* [online]. USA: Inc. Robin America, 2003 [cit. 2014-11-28]. ISBN PUB-ES1740.
- [6] DOUBLE AXI 5345/18 HD GOLD LINE. MODEL MOTORS. *Model motors: modelářské elektromotory AXI, MiniAC, VM* [online]. 2006 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://www.modelmotors.cz/cs/product/detail/254/>
- [7] Datasheet: ICM7555IPAZ DIP8 INTERSIL. *GM Electronic* [online]. Brno: GM electronic, 2016 [cit. 2017-01-04].
Dostupné z: <https://www.gme.cz/icm7555ipaz-dip8-intersil>
- [8] Datasheet: UC3844N. *GM Electronic* [online]. Brno: GM electronic, 2016 [cit. 2017-01-04]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/uc3844n>

PŘÍLOHA 1: KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY PRO ŘÍZENÍ SERVA A OVLÁDÁNÍ KLAPKY SPALOVACÍHO MOTORU

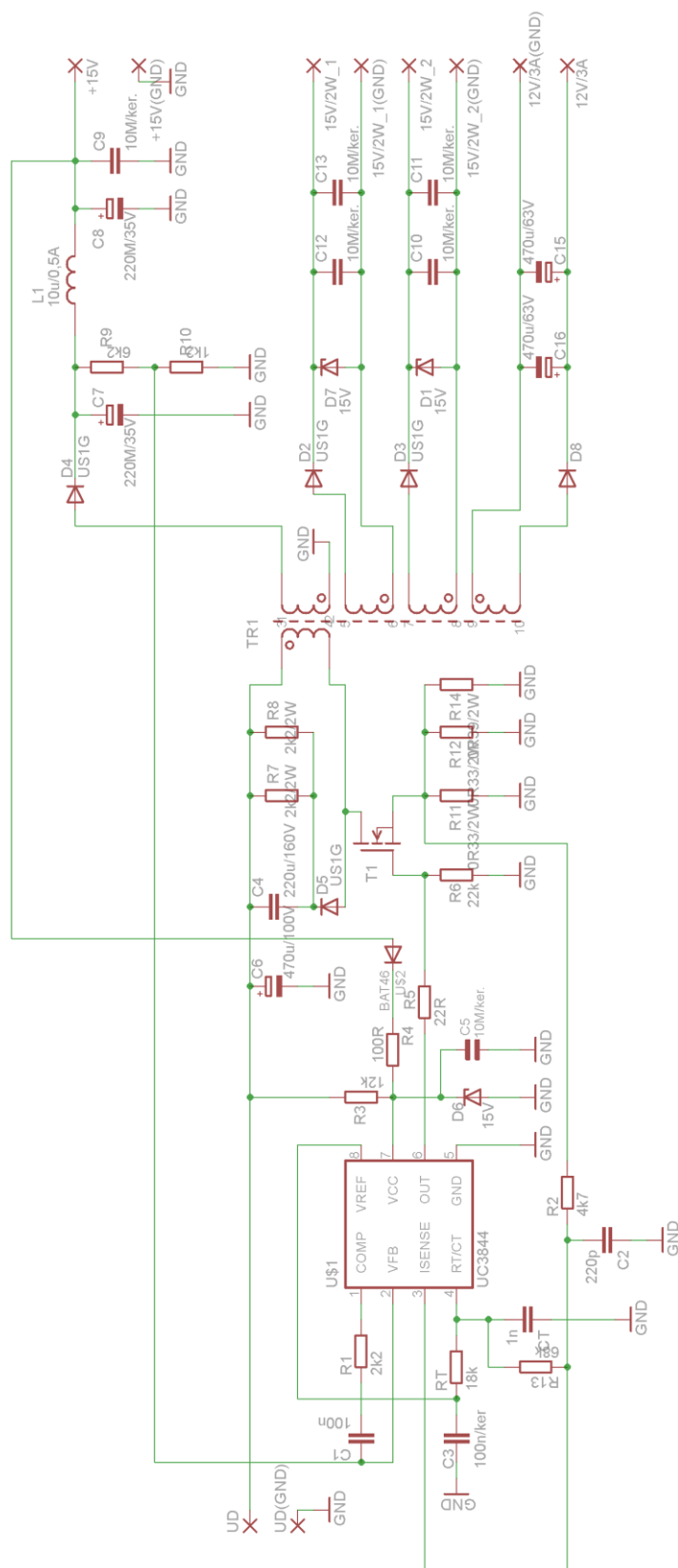


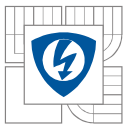


PŘÍLOHA 2: KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY S ŘÍZENÍM VÝKONOVÝCH TRANZISTORŮ A VYTVOŘENÍM PILY

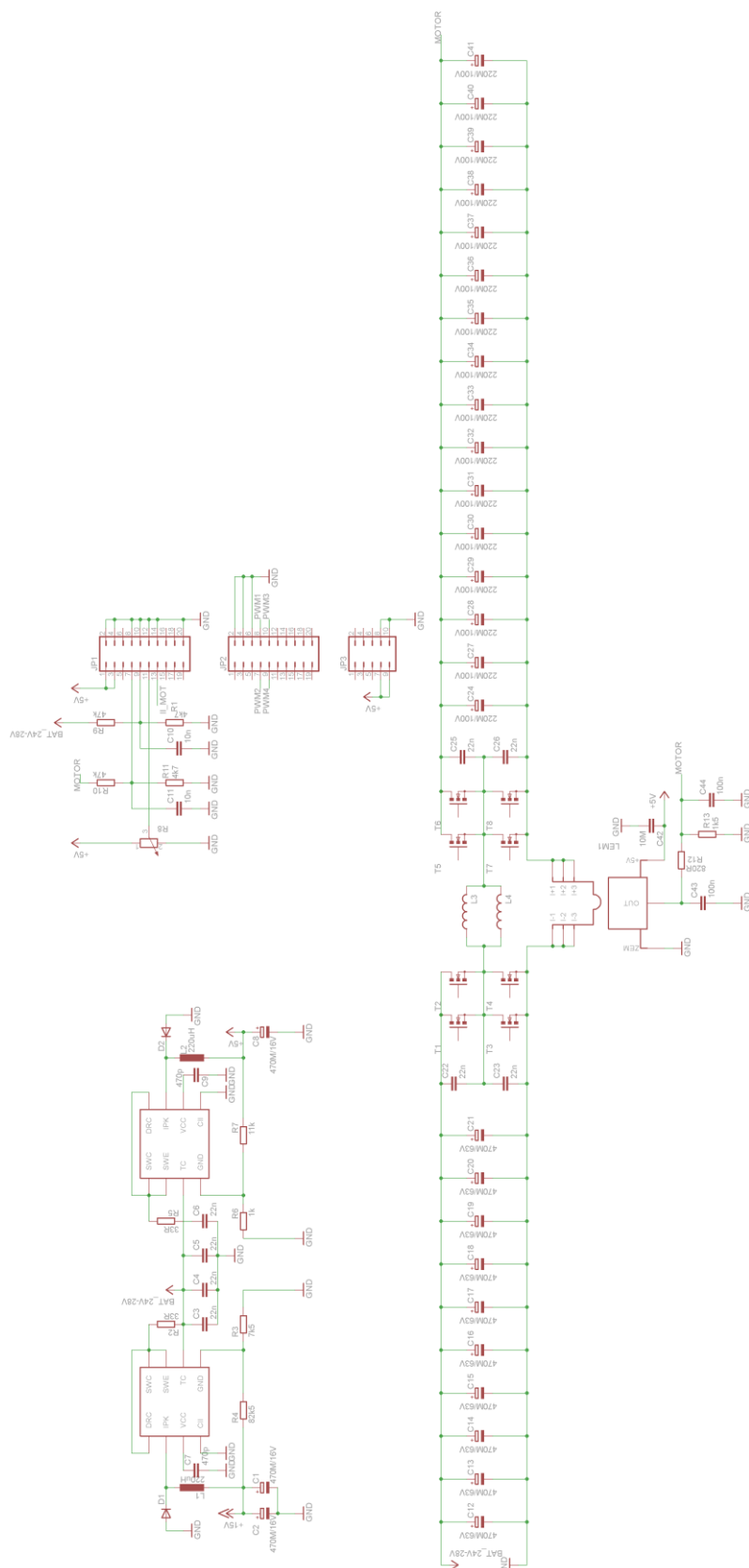


PŘÍLOHA 3: KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY S POMOCNÝM ZDROJEM

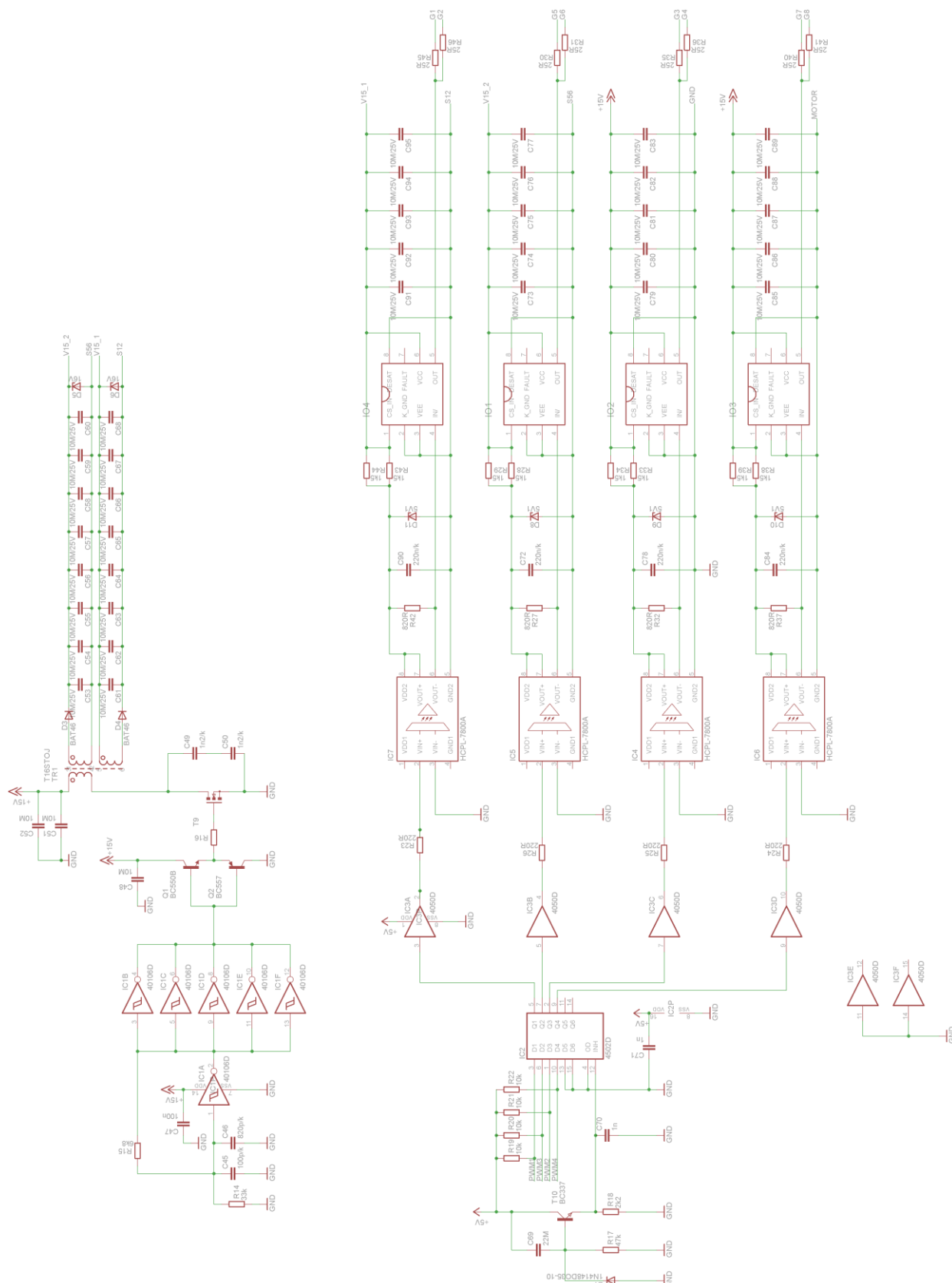


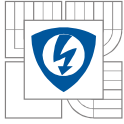


PŘÍLOHA 4: 1. ČÁST SCHÉMATU ZAPOJENÍ DESKY SE SILOVÝMI OBVODY MĚNIČE PŘED ÚPRAVAMI



PŘÍLOHA 5: 2. ČÁST SCHÉMATU ZAPOJENÍ DESKY SE SILOVÝMI OBVODY MĚNIČE PŘED ÚPRAVAMI





PŘÍLOHA 6: KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ DESKY SILOVÝMI OBVODY MĚNIČE PO ÚPRAVÁCH

